

Technische Universität Dresden – Fakultät Umweltwissenschaften

**Alternative Prozesse der Waldrestholzbereitstellung
für eine industrielle stoffliche und energetische Nutzung**

Dissertation

zur Erlangung des Doktorgrades

vorgelegt von Lars Schmidt M.Sc.

geboren am 10.11.1977 in Osnabrück

Tag der Verteidigung: 02. Juli 2020

1. Gutachter: Prof. Dr. Jörn Erler
2. Gutachter: Prof. Dr. Bernhard Möhring
3. Gutachter: Prof. Dr. Thomas Purfürst

Übereinstimmungserklärung

Die Übereinstimmung dieses Exemplars mit dem Original der Dissertation
zum Thema:

**Alternative Prozesse der Waldrestholzbereitstellung
für eine industrielle stoffliche und energetische Nutzung**

wird hiermit bestätigt.

Büren, den 02. Juli 2020

Lars Schmidt

Erklärung zur Eröffnung des Promotionsverfahrens

1. Hiermit versichere ich, dass ich die vorliegende Arbeit ohne unzulässige Hilfe Dritter und ohne Benutzung anderer als der angegebenen Hilfsmittel angefertigt habe; die aus fremden Quellen direkt oder indirekt übernommenen Gedanken sind als solche kenntlich gemacht.
2. Bei der Auswahl und Auswertung des Materials sowie bei der Herstellung des Manuskripts habe ich Unterstützungsleistungen von folgender Person erhalten: Prof. Dr. Jörn Erler.
3. Weitere Personen waren an der geistigen Herstellung der vorliegenden Arbeit nicht beteiligt. Insbesondere habe ich nicht die Hilfe eines kommerziellen Promotionsberaters in Anspruch genommen. Dritte haben von mir weder unmittelbar noch mittelbar geldwerte Leistungen für Arbeiten erhalten, die im Zusammenhang mit dem Inhalt der vorgelegten Dissertation stehen.
4. Die Arbeit wurde bisher weder im Inland noch im Ausland in gleicher oder ähnlicher Form einer anderen Prüfungsbehörde vorgelegt und ist auch noch nicht veröffentlicht worden.
5. Sofern es sich um eine kumulative Dissertation gemäß § 10 Abs. 2 handelt, versichere ich die Einhaltung der dort genannten Bedingungen.
6. Ich bestätige, dass ich die Promotionsordnung der Fakultät Umweltwissenschaften der Technischen Universität Dresden anerkenne.

Büren, den 02. Juli 2020

Lars Schmidt

Vorwort

Die vorliegende Arbeit entstand aus einer Studie des Verfassers zur Versorgung des „*Holzheizkraftwerks Wittgenstein*“ der RWE in Erndtebrück (Landkreis Siegen-Wittgenstein, NRW) mit Waldrestholz. Die Studie wurde durchgeführt von der Pro Forst Gesellschaft für Forstwirtschaft mbH, Bad Wünnenberg. Auftraggeber der Studie mit dem Titel „*Versorgung des BMHKW Erndtebrück - Bereitstellung von Restholz durch die Bündeltechnologie*“ war die RWE Innogy Cogen GmbH mit Sitz in Dortmund. Die Durchführung der Studie wurde im März 2008 in Auftrag gegeben und im Mai 2009 durch Abgabe eines Abschlussberichts beendet. Ein Teil der Fallstudien, die in dieser Arbeit wiedergegeben werden, wurden im Kontext der oben genannten Untersuchung angefertigt.

Mein besonderer Dank gilt Prof. Dr. Jörn Erler für die Übernahme der Betreuung und Begutachtung der vorliegenden Arbeit. Mit wichtigen inhaltlichen sowie strukturellen Hilfestellungen und seiner motivierenden Art hat er entscheidend zum Gelingen dieser Arbeit beigetragen. Prof. Dr. Bernhard Möhring und Prof. Dr. Thomas Purfürst danke ich für die Übernahme des Koreferats.

Von dem fachlichen Austausch und die Diskussionen mit Hubertus Nolte habe ich persönlich außerordentlich profitiert. Den Herren Ulrich Rasche (Fa. Komptech) und Rainer Grebner (Fa. Hammel) möchte ich für die Unterstützung des Forschungsvorhabens durch die kostenlose zur Verfügungstellung der Versuchsmaschinen danken.

Ein besonderer Dank gilt Dr. Carsten H. Emmann, Dr. Jan Hansen und Dr. Nils Tremer. Sie waren insbesondere in der Vorbereitung, aber auch während des Projekts in unterschiedlichen Phasen und Bereichen wichtige Ratgeber. Ebenso gilt mein Dank den Mitarbeitern an der Abteilung Arbeitswissenschaften der Georg-August-Universität Göttingen, vor allem Dr. Jörg Hittenbeck, Dr. Henrik Brokmeier, Dr. Stefan Willems, Meinolf Lau und Dietmar Weber, die mich in meiner Zeit in Göttingen fachlich sowie persönlich unterstützt haben. Ebenso bedanke ich mich bei den Mitarbeitern am Institut für Forsttechnik der Technischen Universität Dresden, hier insbesondere Dr. Christian Knobloch und Marcus Hennek. Dr. Benjamin Engler und Dr. Maurice Strunk standen mir auch abseits des Forschungsvorhabens mit guten Hinweisen zur Verfügung, wofür ich mich aufrichtig bedanke.

Für das gewissenhafte Korrekturlesen des Manuskripts bedanke ich mich herzlich bei Ingo Walhorn. Meinen Dank für die uneingeschränkte Unterstützung, Rücksichtnahme und Geduld, die ich von meiner Familie, insbesondere Katrin erfahren habe, überbringe ich persönlich.

Büren, im Juli 2020

Lars Schmidt

Abstract

The increasing use of timber in Germany has meant that some timber grades are no longer available in sufficient quantities. In order not to endanger the further growth of timber utilization, previously unused wood reserves must be mobilized. Numerous studies consider the residual after main stem harvest, which usually remains unused in the stand, to be particularly suitable for this purpose. However, the supply of logging residue, especially due to the lower loading density, differs significantly from the usual working methods of roundwood harvesting. In view of the fact that logging residues will also be available for industrial use in the future, economic, effective and safe supply chains must be identified and researched.

Until now, research has focused on single process stages of the supply chain without considering them in their entirety. In the past, stationary shredding of logging residues has hardly been taken into account in the studies. This supply alternative is also hardly used in practice, as solutions for the transport of loose material, like slash, have not yet been established. So-called bundlers promise to compress the biomass to improve its handling efficiency and the quantity that can be transported. But there are only few machines of this type and, as some studies have shown, the expected cost of this operation is high.

On the other hand, there is an established supply chain in which the logging residues are chipped in the forest and the chips are transported to the plant by bulk material transporters. However, this is a closed supply chain and often there are waiting times for single process stages. In a model to compare the two supply chains, waiting times are taken into account as well as stationary chipping plants and evaluated on a monetary basis.

Collecting and bundling of logging residues is the most expensive process stage within the supply chain for the stationary chipping. There is a significant correlation between productivity of bundle machine and the slope of the terrain, the diameter of the logs harvested, the amount of logs produced and the harvesting method: Productivity in bundling can be increased by pre-concentrating the cuttings and not shortening the top pieces. Transport of bundle works with usual forest trucks and there is no significant difference in productivity compared to roundwood. It is important to make the load safe with a net or board wall at trailer and truck. Because of the uncoupled supply chain, no waiting time occurs. Due to the slow-running tools, stationary shredding offers considerable advantages in terms of wear and the need for operating materials. Electric drives can further reduce costs.

Powerful mobile chippers enable economical operations in the forest as they can be utilized to full capacity by pre-concentrating the wood in piles. However, when used on forest roads, chipping and transport are connected. This results in waiting times due to lack of space, insufficient transport capacities or road traffic problems. The chipper is the most expensive machine in the supply chain. The waiting time costs, in terms of cost efficiency, may have to be accepted. The cheapest alternative is not necessarily to use the number of transport units required to operate the chipper at full capacity, as the sum of the machine costs of the trucks can exceed those of the chipper. Even small changes in the initial situation can have an impact on the economic result. Therefore, the entrepreneur has to take a close look at and analyze the general conditions of his operations.

Inhaltsverzeichnis

Abbildungsverzeichnis.....	IV
Tabellenverzeichnis.....	VII
1 Einleitung	1
1.1 PROBLEMSTELLUNG UND MOTIVATION	1
1.2 AUFBAU DER ARBEIT	3
2 Stand des Wissens	7
2.1 ROHSTOFFERZEUGUNG IN DER DEUTSCHEN FORSTWIRTSCHAFT	7
2.1.1 Holzeinschlag und -verwendung in Deutschland	8
2.1.2 Waldrestholzpotential für eine industrielle Nutzung	11
2.2 INDUSTRIELLE VERWENDUNG VON WALDRESTHOLZ	14
2.2.1 Definition	14
2.2.2 Die stoffliche Nutzung	15
2.2.3 Kostenstruktur der Holzwerkstoffindustrie	18
2.2.4 Die energetische Nutzung	20
2.2.5 Kraftwerkstechnik	23
2.2.6 Gesetzliche Grundlagen	26
2.2.7 Kostenstruktur von Holzheizkraftwerken	27
2.2.8 Konkretes Beispiel einer industriellen energetischen Nutzung	30
2.3 BEREITSTELLUNG VON WALDRESTHOLZ	33
2.3.1 Logistik und relevante Bereitstellungsketten	33
2.3.2 Zerkleinerung im Wald / Hackschnitzellinien	35
2.3.3 Zerkleinerung am Werk / Bündellinien	42
2.4 LAGERUNG, TROCKNUNG UND KLASSIERUNG VON WALDRESTHOLZ	49
2.4.1 Lagerung von Waldrestholz	49
2.4.2 Trocknung von Waldrestholz	50
2.4.3 Siebklassierung von Waldrestholz	53
2.5 ABRECHNUNGSMÖGLICHKEITEN	55
2.5.1 Abrechnung nach Volumen	55
2.5.2 Abrechnung nach Holzmasse	56
2.5.3 Abrechnung nach Gütern oder Energie	57
2.6 INFORMATIONENFLUSS IN DER LOGISTIKKETTE	58
3 Methoden	62
3.1 ÜBERBLICK	62
3.2 ZERKLEINERUNG IM WALD	62
3.2.1 Teilprozess Rückung Schlagabraum	62
3.2.2 Teilprozess mobile Zerkleinerung	63
3.2.3 Teilprozess Ferntransport von Hackschnitzeln	65
3.3 ZERKLEINERUNG AM WERK	67
3.3.1 Teilprozess Bündelung	67
3.3.2 Teilprozess Bündelrückung	70
3.3.3 Teilprozess Ferntransport der Bündel	71
3.3.4 Teilprozess zentrale Holzaufbereitung	75

3.4	MATERIALANALYSE	79
3.5	VORAUSKALKULATION DER KOSTEN VON BETRIEBSMITTELN.....	81
3.5.1	<i>Die produktive Arbeitszeit und Personalkosten.....</i>	81
3.5.2	<i>Kraftstoff- und Stromkosten.....</i>	82
3.5.3	<i>Kalkulation der Kosten von Forst- und Stationärmaschinen</i>	83
3.5.4	<i>Kalkulation der Kosten von Lkw</i>	85
3.5.5	<i>Die Kalkulation der Kosten von Aufbau- und Anhängelhackern.....</i>	87
3.6	VERGLEICH VON BEREITSTELLUNGSKETTEN.....	89
3.7	AUSWERTUNG DER GEWONNENEN DATEN.....	91
3.7.1	<i>Leistung und Zeitbedarf.....</i>	91
3.7.2	<i>Statistische Auswertung.....</i>	93
4	Ergebnisse zu den physikalischen Eigenschaften von Waldrestholzgebünden	95
4.1	BÜNDEL-/ WALDRESTHOLZANFALL.....	95
4.2	BÜNDELMASSE	96
4.3	NATÜRLICHES TROCKENVERHALTEN VON BÜNDELN.....	100
4.4	MATERIALANALYSE VON ZERKLEINERTEN BÜNDELN	101
5	Schritte zu einem Modell zur Durchführung eines Bereitstellungskettenvergleichs	107
5.1	EINGANGSDATEN.....	107
5.2	BEREITSTELLUNGSKETTE ZERKLEINERUNG IM WALD	108
5.2.1	<i>Teilprozess Rücken von Schlagabraum</i>	108
5.2.2	<i>Teilprozess mobile Zerkleinerung von Schlagabraum – Zeitverbrauch.....</i>	112
5.2.3	<i>Teilprozess mobile Zerkleinerung von Schlagabraum – Kosten</i>	115
5.2.4	<i>Teilprozess Transport von Hackschnitzeln – Ladevolumen und zulässige Nutzlast.....</i>	118
5.2.5	<i>Teilprozess Transport von Hackschnitzeln – Fahren.....</i>	121
5.2.6	<i>Teilprozess Transport von Hackschnitzeln – Laden und Rangieren</i>	122
5.2.7	<i>Teilprozess Transport von Hackschnitzeln – Zeitverbrauch</i>	125
5.2.8	<i>Teilprozess Transport von Hackschnitzeln – Kosten.....</i>	128
5.2.9	<i>Übersicht Zerkleinerung im Wald</i>	130
5.3	BEREITSTELLUNGSKETTE ZERKLEINERUNG AM WERK	132
5.3.1	<i>Teilprozess Bündeln - Technische Arbeitsproduktivität</i>	132
5.3.2	<i>Teilprozess Bündeln - Kosten</i>	136
5.3.3	<i>Teilprozess Bündelrückung.....</i>	138
5.3.4	<i>Teilprozess Ferntransport von Bündeln durch Kurzholz-Lkw.....</i>	139
5.3.5	<i>Teilprozess Ferntransport von Bündeln – Zeitverbrauch und Kosten.....</i>	142
5.3.6	<i>Teilprozess zentrale Holzaufbereitung – Stationäre Zerkleinerung.....</i>	145
5.3.7	<i>Teilprozess zentrale Holzaufbereitung – Stationäre Sortimentierung / Siebung.....</i>	148
5.3.8	<i>Teilprozess zentrale Holzaufbereitung – Zeitverbrauch und Kosten.....</i>	150
5.3.9	<i>Übersicht Zerkleinerung am Werk</i>	151
6	Ergebnisse durch Anwendung des Vergleichs	153
6.1	ÜBERPRÜFUNG DES MODELLS DURCH PRAXISBEISPIELE.....	153
6.1.1	<i>Überprüfung des Modells am Beispiel 1: Buchenrestholz aus Durchforstung.....</i>	154
6.1.2	<i>Überprüfung des Modells am Beispiel 2: Fichtenrestholz nach Windwurf.....</i>	155
6.1.3	<i>Überprüfung des Modells am Beispiel 3: Fichtenrestholz nach Kahlschlag</i>	157
6.2	SENSITIVITÄTSANALYSE	159

6.2.1	<i>Abhängigkeit der Durchschnittskosten von der Transportentfernung.....</i>	160
6.2.2	<i>Abhängigkeit der Durchschnittskosten von der Produktivität beim Bündeln.....</i>	163
6.2.3	<i>Abhängigkeit der Durchschnittskosten vom Gesamtholzvolumen.....</i>	165
6.2.4	<i>Abhängigkeit der Durchschnittskosten vom Preis für Dieselkraftstoff.....</i>	166
7	Diskussion	168
7.1	METHODENDISKUSSION	168
7.2	ERGEBNISDISKUSSION ZERKLEINERUNG IM WALD.....	170
7.2.1	<i>Teilprozess Rückung Schlagabraum.....</i>	170
7.2.2	<i>Teilprozess Zerkleinerung</i>	172
7.2.3	<i>Teilprozess Hackschnitzeltransport.....</i>	174
7.3	ERGEBNISDISKUSSION ZERKLEINERUNG AM WERK	175
7.3.1	<i>Teilprozess Bündelung.....</i>	175
7.3.2	<i>Teilprozess Bündelrückung.....</i>	177
7.3.3	<i>Teilprozess Ferntransport der Bündel.....</i>	179
7.3.4	<i>Teilprozess stationäre Verarbeitung der Bündel.....</i>	180
7.4	ERGEBNISDISKUSSION ANWENDUNG DES BEREITSTELLUNGSKETTENVERGLEICHS	181
7.4.1	<i>Überprüfung des Modelles</i>	181
7.4.2	<i>Ergebnisdiskussion der Sensitivitätsanalyse</i>	183
8	Schlussfolgerungen	185
9	Zusammenfassung	191
10	Literaturverzeichnis	194
10.1	GESETZE UND VERORDNUNGEN	210
10.2	PRODUKT- UND HERSTELLERINFORMATIONEN	211
Anhang	i

Abbildungsverzeichnis

<i>Abbildung 1: Struktureller Aufbau der Arbeit.....</i>	<i>5</i>
<i>Abbildung 2: Der Holzeinschlag in den deutschen Bundesländern in Millionen Kubikmeter ohne Rinde im Jahr 2016. Eigene Darstellung auf Basis der Holzeinschlagsstatistik des Statistischen Bundesamtes (DESTATIS, 2017).....</i>	<i>8</i>
<i>Abbildung 3: Erzeugerpreisindex forstwirtschaftlicher Produkte aus den Staatsforsten in Deutschland ohne Umsatzsteuer. Preisindex für Buchen- und Fichtenstamm- und -industrieholz. Eigene Darstellung auf Basis der Preisindizes des Statistischen Bundesamtes (DESTATIS, 2013A).</i>	<i>10</i>
<i>Abbildung 4: Relative Bedeutung unterschiedlicher verfügbarer Rohstoffe am Gesamtaufkommen der biogenen Reststoffe in Höhe von circa 75 Millionen Tonnen pro Jahr in Deutschland. Eigene Darstellung nach LEIBLE ET AL. (2003).</i>	<i>12</i>
<i>Abbildung 5: Produktionsvolumen der Holzwerkstoffindustrie in Deutschland. Eigene Darstellung nach MANTAU (2010B) für das Jahr 2010; EPF (2006); RÖDER (2006) für die Jahre 2001 bis 2005.</i>	<i>16</i>
<i>Abbildung 6: Rohstoffquellen der Holzwerkstoffindustrie in Deutschland 2011. Faserholzanteil der verschiedenen Herkunft am Rohstoffmix. Eigene Darstellung nach Ergebnissen von MANTAU (2012A); MARUTZKY (2000).</i>	<i>18</i>
<i>Abbildung 7: Kostenstruktur der Hersteller von Holzplatten, Zellstoff und Papier (links) sowie von Furnier-, Sperrholz-, Holzfaser- und Spanplatten (rechts). Nähere Spezifizierung der Rohstoffkosten in der Spanplattenherstellung (Tortendiagramm); wobei RH = Rohholz; IRH = Industrierestholz; AH = Altholz; ChE = Chemische Erzeugnisse; HS = Holz, Zellstoff, Papier, Pappe, Karton; *Sonstiges. Eigene Darstellung, Daten aus DESTATIS (2013B) und SEINTSCH (2011).</i>	<i>19</i>
<i>Abbildung 8: Anlagenbestand nach Größenklassen und installierte elektrische Gesamtleistung aller Biomasse(heiz)kraftwerke in Deutschland in den Jahren 2000 bis 2011. Berücksichtigt sind ausschließlich Anlagen, die eine Vergütung nach dem EEG erhalten. Eigene Darstellung auf Basis der Daten von DBFZ (2012).</i>	<i>20</i>
<i>Abbildung 9: In Deutschland vorhandene Biomasseheiz(kraft)werke (links) sowie die installierte elektrische Leistung in Megawatt aller Biomasse(heiz)kraftwerke in Deutschland, aufgeteilt nach Bundesländern, im Jahr 2010 (rechts), nach DBFZ, 2012.....</i>	<i>21</i>
<i>Abbildung 10: Brennstoffeinsatz von naturbelassenem Holz in unterschiedlich großen, deutschen Biomasse(heiz)kraftwerken, die ausschließlich mit naturbelassenem Holz befeuert werden. Im Vergleich dazu die gesamte installierte elektrische Leistung der ungleichen, nicht standardisierten Kraftwerksklassen im Jahr 2011 (Datenbasis aus DBFZ, 2012).</i>	<i>22</i>
<i>Abbildung 11: Draufsicht (links) und Seitenansicht (Mitte) eines luftgekühlten Treppenrostes; Aufnahmen vom Holzkraftwerk Domat/Ems (Ch) sowie verbrannte Roststäbe (rechts) infolge zu hoher thermischer Belastung; aus FRANZ (2009).....</i>	<i>24</i>
<i>Abbildung 12: Kalkulierte Stromgestehungskosten für drei unterschiedliche Holzheizkraftwerke. Nähere Informationen zu den Varianten (1-3) sind der Tabelle 4 zu entnehmen.</i>	<i>29</i>

Abbildung 13: Verfahrensfunktiogramm: Zerkleinerung im Wald (Grafik in Anlehnung an ERLER ET AL., 2009).....	35
Abbildung 14: Seitenansicht eines Astgreifers / auch (Vier)Fingergreifer genannt (links), modifizierte Rungen eines Forwarders (Mitte) und ein sogenannter Presscollector (rechts; WELLINK, 2013).....	36
Abbildung 15: Abrollkipper mit unterschiedlichen Hakenliftgeräten. Von links nach rechts: Schub-, Knick- und Schub-Knickhakenliftgerät (HIAB, 2013).....	39
Abbildung 16: Schematische Zeichnung eines typischen Abrollcontainers. Seitenansicht (A), Vorderseite mit Öse (B) und Hinterseite mit Klappen und Rollen (C). Eigene Darstellung aus www.rainbow-containers.de	40
Abbildung 17: Schlepper mit Tridem Rollbandwagen.	41
Abbildung 18: Verfahrensfunktiogramm: Zerkleinerung am Werk (Grafik in Anlehnung an ERLER ET AL., 2009).....	42
Abbildung 19: Mehrfadenbündler WoodPac der Firma Komatsu Forest (links; LUCERO, 2009) und Fixteri der Firma Biotukki (rechts; FIXTERI, 2013).....	43
Abbildung 20: Einfadenbündler von John Deere (1; NUHN, 2013), Dingoma (2; DINGOMA 2013); Monra Forestal (3; MONRA, 2013) und Pinox (4).....	44
Abbildung 21: Eigenentladung (links) und Fremdentladung (Mitte, rechts; TIMPERI, 2003) von Bündeln, transportiert mit unterschiedlich modifizierten Rundholz-Lkw.	47
Abbildung 22: Funktionsprinzip eines Sternsiebes (MACK, 2013; verändert).....	55
Abbildung 23: Versuchshacker HEM 560 Z von Jenz (rechts), Detailaufnahme der Hackertrommel (Mitte) und von einem nahezu verstopften Auswurfgebläse (links).	64
Abbildung 24: Tridem Rollbandwagen (links, Krampe, 2013; vgl. Abbildung 17) und Dreiseitenkipper (rechts, Kröger, 2013).....	65
Abbildung 25: Multimaschine Pinox 828 (rechts im Bild) und das abnehmbare Bündelaggregat Pinox 330 (links).....	67
Abbildung 26: Versuchsfahrzeuge für die Bündelrückung. Der Forwarder P818 (links) sowie die Kombimaschine P828 (rechts) von Pinox.	70
Abbildung 27: Überblick über eingesetzte Holztransportvarianten. Kurzholzzug mit offener (K1), geschlossener (K2) Bodenplatte und mit Seitenwänden (K3) sowie Kombizug (K4).	72
Abbildung 28: Containerbeladung (rechts) und Entladung durch Kippen (links) beim Bündeltransport mit Containerfahrzeugen.	72
Abbildung 29: Versuchszerkleinerer VB 750 von Hammel.....	76
Abbildung 30: Detailaufnahme der Walzen (links) und des kippbaren Fülltrichters (rechts). .	76
Abbildung 31: Versuchszerkleinerer Crambo 5000 von Komptech.	77
Abbildung 32: Detailansicht der Walzen (links) und des auswechselbaren Siebkorbs (rechts) des Crambos.....	77
Abbildung 33: Versuchssiebanlage Multistar M3 von Komptech.....	78
Abbildung 34: Die Methoden zur Ermittlung der Entscheidungskriterien bei einem wirtschaftlichen Vergleich (MAYBAUM ET AL., 2011, verändert).....	90
Abbildung 35: Korngrößenverteilung der Hackgutproben aus den unterschiedlichen Zerkleinerern.....	102

Abbildung 36: Anteil von Feinkorn (<10 mm; N = 11); Mittelkorn (10-80 mm; N = 11) und Grobgut (>80 mm; N = 3) der Sternsiebanlage Komptech Multistar M3 am Gesamtvolumen der Proben.....	104
Abbildung 37: Relativer Anteil der unterschiedlichen Korngrößenklassen an der Gesamtmasse der Hackgutprobe (N = 62).	105
Abbildung 38: Die Leistung beim Rücken von Schlagabraum in Abhängigkeit zur mittleren Rückeentfernung. Kreise: eigene Erhebungen (N = 30); Dreiecke: GEWECKE, 2004 (N = 7); Kreuze: STERNER, 2004 (N = 8); gestrichelt: polynomische Trendlinie ($R^2 = 0,42$).	111
Abbildung 39: Exemplarischer Arbeitsablauf von einem Gliederzug-Lkw mit zwei Abrollcontainern beim Transport von Holzhackgut bei der mobilen Hackung. ..	124
Abbildung 40: Produktivität beim Rücken von Bündeln in Abhängigkeit der Rückeentfernung. Minimal-, Maximal- und Mittelwerte der tageweisen Leistungsaufschriebe (N = 46).....	139
Abbildung 41: Entladung der Bündel durch den Ladekran der Kurzholz-Lkw.....	141
Abbildung 42: Detailaufnahme vom unteren Siebdeck (links) und der Materialaufgabe (rechts) bei einem Sternsieb.....	148
Abbildung 43: Jährliche Reparaturkosten der stationären Zerkleinerungsanlage am Beispiel des Crambo 5000 der Firma Komptech (Rauten) und polynomische Trendlinie ($R^2 = 0,4$) bei Annahme von 5.000 BS/a.....	151
Abbildung 44: Durchschnittskosten der Bereitstellungsketten in Abhängigkeit der Anzahl gleichzeitig eingesetzter Lkw sowie der Transportentfernung.....	161
Abbildung 45: Durchschnittskosten der Bereitstellungsketten in Abhängigkeit der Ladungsmasse sowie der Transportentfernung.....	162
Abbildung 46: Durchschnittskosten für Bereitstellungskette 2 bei unterschiedlichen Leistungen beim Bündeln (gestr. Linie: Bereitstellungskette 1 analog Beispieldaten).	163
Abbildung 47: Der Einfluss veränderter Variablen auf die Arbeitsleistung beim Bündeln im Vergleich zur Zerkleinerung im Wald.....	164
Abbildung 48: Durchschnittskosten der Bereitstellungsketten in Abhängigkeit des Gesamtholzvolumens je Einsatzort.	165
Abbildung 49: Durchschnittskosten der Bereitstellungsketten in Abhängigkeit von den Kosten für Dieselkraftstoff.	166
Abbildung 50: In einem Polter aufgestezte Waldrestholzbündel.	179

Tabellenverzeichnis

<i>Tabelle 1: Einteilung der Heizkessel nach ihrer Feuerungswärmeleistung.....</i>	<i>14</i>
<i>Tabelle 2: Anforderungen der Rost- und Wirbelschichtfeuerung an den Brennstoff.</i>	<i>24</i>
<i>Tabelle 3: Vergütung für den Einsatz fester Biomasse bei der Stromerzeugung (EEG, 2012 / BIOMASSEV).....</i>	<i>26</i>
<i>Tabelle 4: Beispielkalkulationen zur Berechnung der Stromgestehungskosten eines Holzheizkraftwerks unterschiedlicher Autoren.</i>	<i>30</i>
<i>Tabelle 5: Spezifikation Hackschnitzel für das BMHKW in Erndtebrück.....</i>	<i>31</i>
<i>Tabelle 6: Abschnitte der Holz Trocknung und die Arten der Wasserbindung bei unterschiedlichem Wassergehalt (w) des Holzes.</i>	<i>51</i>
<i>Tabelle 7: Überblick über die Methoden der Datenerhebung bei den Feldstudien.</i>	<i>62</i>
<i>Tabelle 8: Untersuchte Maschinen zur mobilen Hackung. Anzahl der untersuchten Tage, Betriebsstunden der Hacker und der produzierten Hackschnitzelmengen.</i>	<i>64</i>
<i>Tabelle 9: Übersicht der Transportvarianten. Anzahl der untersuchten Fälle, gesamtes Transportvolumen und mittlere einfache Transportentfernung.....</i>	<i>65</i>
<i>Tabelle 10: Definition der einzelnen Ablaufabschnitte beim Transport von Hackgut.</i>	<i>66</i>
<i>Tabelle 11: Untersuchte Restholzbündler und wichtige Kennwerte.</i>	<i>67</i>
<i>Tabelle 12: Im Rahmen der Hiebsprotokolle erfasste Variablen.</i>	<i>68</i>
<i>Tabelle 13: Einteilung der Geländeneigung auf den Hiebsflächen in Neigungsbereichen.....</i>	<i>69</i>
<i>Tabelle 14: Einteilung der Erntemethode auf den Hiebsflächen in Gruppen bzw. Codierung der Dummy-Variablen für die Regressionsanalyse.....</i>	<i>69</i>
<i>Tabelle 15: Einteilung der mittleren Rückeentfernung in Klassen zur Abfrage im Erfassungsbogen.</i>	<i>71</i>
<i>Tabelle 16: Überblick über die eingesetzten Transportvarianten.</i>	<i>71</i>
<i>Tabelle 17: Definition der einzelnen Ablaufabschnitte beim Bündeltransport mit Lkw.</i>	<i>73</i>
<i>Tabelle 18: Definition des alternativen Ablaufabschnittes Wiegen beim Bündeltransport mit Lkw.</i>	<i>74</i>
<i>Tabelle 19: Übersicht über die erhobenen Zeiten, das verwendete Beladefahrzeug und die Anzahl der transportierten Bündel (N) beim Transport durch Containerfahrzeuge.</i>	<i>74</i>
<i>Tabelle 20: Bezeichnung der im Versuch eingesetzten Zerkleinerungsmaschinen, Name des Herstellers, Einteilung in Kategorie und Anzahl der zerkleinerten Bündel.....</i>	<i>75</i>
<i>Tabelle 21: Bezeichnung der verwendeten Siebe, der Maschenweite und der gesiebten Fraktionen.</i>	<i>80</i>
<i>Tabelle 22: Listenpreis und Bezeichnung der kalkulierten Forstmaschinen.</i>	<i>83</i>
<i>Tabelle 23: Listenpreis und Bezeichnung der kalkulierten stationären Maschinen.....</i>	<i>84</i>
<i>Tabelle 24: Kostenkalkulation Abrollkipper Lkw (a): Spezifische Eingangsdaten.</i>	<i>85</i>
<i>Tabelle 25: Kostenkalkulation Kurzholzzug (k): Spezifische Eingangsdaten.....</i>	<i>86</i>
<i>Tabelle 26: Kostenkalkulation Abrollkipper und Kurzholzzug: Kalkulationsdaten.</i>	<i>87</i>
<i>Tabelle 27: Kostenkalkulation Lkw-Abrollkipper und Kurzholzzug: Personal.....</i>	<i>87</i>
<i>Tabelle 28: Kostenkalkulation Anhängenhacker inkl. Zugfahrzeug (h): Eingangsdaten.</i>	<i>88</i>
<i>Tabelle 29: Kostenkalkulation Anhängenhacker: allgemeine Kalkulationsdaten.</i>	<i>89</i>
<i>Tabelle 30: Kostenkalkulation Anhängenhacker: Personalkosten.....</i>	<i>89</i>

<i>Tabelle 31: Zielgrößen und deren Kriterien für die Entscheidungsfindung.</i>	90
<i>Tabelle 32: Die Berechnung der Gesamtkosten (K) und der Kosten der einzelnen Prozessstufen (k) bei der mobilen (Kette 1) und der stationären (Kette 2) Zerkleinerung von Waldrestholz (B = Bündeln; R = Rücken; T = Ferntransport; Z = Zerkleinerung; S = Siebung).</i>	91
<i>Tabelle 33: Definition der Arbeitszeiten.</i>	91
<i>Tabelle 34: Übersicht über die Orte der durchgeführten flächenbezogenen Erhebungen.</i>	95
<i>Tabelle 35: Ergebnis der fuhrenweisen Massebestimmung von Bündeln aus Fichtenschlagabraum nach Windwurf.</i>	97
<i>Tabelle 36: Anzahl der Touren und Bündel sowie Mittelwert und Standardabweichung der fuhrenweise ermittelten Bündelmasse in zwei Revieren. Zum Vergleich der Mittelwerte erfolgt ein Mann-Whitney-U-Test.</i>	98
<i>Tabelle 37: Durchschnittliche Flächengröße, Zopfdurchmesser und Holzanfall in beiden Revieren.</i>	98
<i>Tabelle 38: Ergebnis der fuhrenweisen Masseermittlung von Laubholzbündeln (SBK = Straßenbegleitgrün).</i>	99
<i>Tabelle 39: Ergebnis der Masse- und Wassergehaltsbestimmung (WG) an verschiedenen Proben (TM-Gehalt = 100 – WG).</i>	99
<i>Tabelle 40: Die Masseangaben von Bündeln in der Literatur.</i>	100
<i>Tabelle 41: Übersicht über die Tests zur Überprüfung, ob sich die Korngrößenverteilungen der Zerkleinerer in den angegebenen Hackgut-Größenklassen signifikant unterscheiden.</i>	103
<i>Tabelle 42: Bereitstellungskettenvergleich: Eingangsdaten für den kalkulierten Einsatz.</i>	107
<i>Tabelle 43: Arithmetisches Mittel, Minimal- und Maximalwert sowie Median der Produktivität beim Rücken von Schlagabraum aus der Literatur (N = 33).</i>	108
<i>Tabelle 44: Korrelationskoeffizienten (nach PEARSON) zwischen der Produktivität [SRm/MAS] beim Rücken von losem Schlagabraum und einzelnen untersuchten Parametern.</i>	109
<i>Tabelle 45: Ergebnis der hiebsweisen Leistungsaufschriebe beim Rücken von Schlagabraum (N = 30).</i>	110
<i>Tabelle 46: Korrekturfaktoren zur Angleichung der Produktivität beim Rücken bei einer von 100 Metern abweichenden mittleren Rückeentfernung (nach LÜTHY, 1997).</i>	111
<i>Tabelle 47: Ergebnis der tageweisen Leistungsaufschriebe bei der mobilen Hackung (N = 22).</i>	112
<i>Tabelle 48: Kostenkalkulation Anhängenhacker: Ergebnis Fixkosten.</i>	116
<i>Tabelle 49: Kostenkalkulation Anhängenhacker: Rechenwege variable Kosten (j: jährliche Leistungsbeanspruchung).</i>	116
<i>Tabelle 50: Kostenkalkulation Anhängenhacker: Ergebnis variable Kosten.</i>	117
<i>Tabelle 51: Kostenkalkulation Anhängenhacker: Ergebnis Gesamtkosten.</i>	117
<i>Tabelle 52: Maximales Ladevolumen und gesetzlich zulässige Nutzlast von vier Transportalternativen für den Transport von Schüttgut. Angegeben wird die Auslastung der gesetzlich zulässigen Nutzlast bei voller Ausnutzung des maximalen Ladevolumens und bei unterschiedlichen Hackgutdichten in Prozent.</i>	119

<i>Tabelle 53: Maximal zulässiges Ladevolumen, Mittelwert vom Transportvolumen bei den Datenaufnahmen und die Auslastungsprozente bezogen auf das zulässige Ladevolumen beziehungsweise die maximale Nutzlast bei den drei Transportalternativen für den Holzhackguttransport.</i>	<i>120</i>
<i>Tabelle 54: Wesentliche Kennwerte der drei Transportalternativen sowie die Durchschnittsgeschwindigkeit beim Transport von Holzhackgut.....</i>	<i>121</i>
<i>Tabelle 55: Der durchschnittliche Zeitaufwand pro Tour für das Manipulieren der Fahrzeuge beim Hackguttransport als Ergebnis der Zeitstudie.</i>	<i>123</i>
<i>Tabelle 56: Zeitverbrauch für das Manipulieren von Fahrzeug und Container eines Einzelfahrzeugs oder eines Gliederzuges je Fuhre bei unterschiedlichen Platzverhältnissen am Ort der Hackung.</i>	<i>127</i>
<i>Tabelle 57: Zeitverbrauch Abrollkipper-Lkw: Be- und Entladung.....</i>	<i>128</i>
<i>Tabelle 58: Kostenkalkulation Abrollkipper-Lkw und Kurzholzzug: Berechnungen.....</i>	<i>129</i>
<i>Tabelle 59: Kostenkalkulation Abrollkipper-Lkw: Ergebnis Fixkosten.....</i>	<i>129</i>
<i>Tabelle 60: Kostenkalkulation Abrollkipper: Ergebnis Variable Kosten.</i>	<i>130</i>
<i>Tabelle 61: Übersicht Modell Bereitstellungskettenvergleich – Zerkleinerung im Wald (B = Bündeln; R = Rücken; T = Ferntransport; Z = Zerkleinerung; S = Siebung).....</i>	<i>130</i>
<i>Tabelle 62: Korrelationskoeffizienten (nach PEARSON) zwischen einzelnen untersuchten Parametern.</i>	<i>132</i>
<i>Tabelle 63: Einfluss der Geländeneigung auf die Produktivität beim Bündeln von Restholz. Die vier Faktorstufen (Geländeneigung) weisen signifikante Unterschiede auf (Signifikanzniveau: $\alpha = 0,05$).</i>	<i>133</i>
<i>Tabelle 64: Einfluss der unterschiedlichen Vorgehensweisen bei der hochmechanisierten Ernte des Stammholzes auf die Produktivität beim Bündeln von Restholz. Die vier Faktorstufen (Erntemethode: A, B = Wipfel vorkonzentriert) weisen signifikante Unterschiede auf (Signifikanzniveau: $\alpha = 0,05$).</i>	<i>134</i>
<i>Tabelle 65: Spezifische Maschinenkosten für Bündler in unterschiedlichen Ländern aus Literaturverweisen.</i>	<i>137</i>
<i>Tabelle 66: Die Produktivität beim Rücken von Bündeln als Ergebnis der Auswertung von Leistungsaufschrieben (Signifikanzniveau: $\alpha = 0,05$).</i>	<i>138</i>
<i>Tabelle 67: Ergebnis der Zeitstudie beim Bündeltransport mit unterschiedlichen Modellen an Kurzholz-Lkw. Angegeben sind die Mittelwerte der Ladezeit, der geladenen Bündel und der einfachen Transportentfernung (dT).</i>	<i>140</i>
<i>Tabelle 68: Kostenkalkulation Kurzholzzug: Be- und Entladung.</i>	<i>143</i>
<i>Tabelle 69: Kostenkalkulation Kurzholzzug: Ergebnis Fixkosten.</i>	<i>143</i>
<i>Tabelle 70: Kostenkalkulation Kurzholzzug: Ergebnis Variable Kosten.....</i>	<i>144</i>
<i>Tabelle 71: Zusammenfassung der Ergebnisse der Zeitstudien bei der zentralen Zerkleinerung.</i>	<i>146</i>
<i>Tabelle 72: Spezifischer Kraftstoffverbrauch (g/kWh) und Kraftstoffverbrauch pro Zeiteinheit (L/BS) der Zerkleinerungsmaschinen.</i>	<i>147</i>
<i>Tabelle 73: Vergleich der Energiekosten eines Crambo 5000 bei Volllast und bei einem Elektro- oder Dieselantrieb.</i>	<i>147</i>
<i>Tabelle 74: Das Volumen der unterschiedlichen Größenfraktionen nach der Siebung von Waldrestholz mit einem Sternsieb.</i>	<i>149</i>
<i>Tabelle 75: Ergebnisse der Zeitstudie zur Siebung von Waldrestholz mit einem Sternsieb.</i>	<i>149</i>

<i>Tabelle 76: Übersicht Modell Bereitstellungskettenvergleich – Zerkleinerung am Werk (B = Bündeln; R = Rücken; T = Ferntransport; Z = Zerkleinerung; S = Siebung).....</i>	<i>152</i>
<i>Tabelle 77: Bereitstellungskettenvergleich: Eingangsdaten der drei Praxisbeispiele.</i>	<i>153</i>
<i>Tabelle 78: Bereitstellungskettenvergleich: Leistungsdaten von Praxisbeispiel 1.</i>	<i>154</i>
<i>Tabelle 79: Bereitstellungskettenvergleich: Kosten der einzelnen Arbeitsverfahren und Gesamtkosten für Beispiel 1.....</i>	<i>155</i>
<i>Tabelle 80: Bereitstellungskettenvergleich: Leistungsdaten von Praxisbeispiel 2.</i>	<i>156</i>
<i>Tabelle 81: Bereitstellungskettenvergleich: Kosten der einzelnen Arbeitsverfahren und Gesamtkosten für Beispiel 2.....</i>	<i>157</i>
<i>Tabelle 82: Bereitstellungskettenvergleich: Leistungsdaten von Praxisbeispiel 3.</i>	<i>158</i>
<i>Tabelle 83: Bereitstellungskettenvergleich: Kosten der einzelnen Arbeitsverfahren und Gesamtkosten für Beispiel 3.....</i>	<i>158</i>
<i>Tabelle 84: Bereitstellungskettenvergleich: Eingangsdaten für die Sensitivitätsanalyse.</i>	<i>159</i>
<i>Tabelle 85: Bereitstellungskettenvergleich: Leistungsdaten für die Sensitivitätsanalyse.</i>	<i>160</i>
<i>Tabelle 86: Bereitstellungskettenvergleich: Kosten der einzelnen Arbeitsverfahren für die Sensitivitätsanalyse.....</i>	<i>160</i>
<i>Tabelle 87: Anzahl gleichzeitig eingesetzter Lkw und deren Einfluss auf Wartezeiten (Z_w) für Lkw und Hacker (H) bei der Bereitstellungskette 1 sowie die Durchschnittskosten im vorliegenden Fall.</i>	<i>161</i>
<i>Tabelle 88: Wartezeiten (Z_w) des Hackers (H) in Abhängigkeit der Transportentfernung (dT) und der Anzahl gleichzeitig eingesetzter Lkw.</i>	<i>162</i>

1 Einleitung

1.1 Problemstellung und Motivation

In den letzten drei Jahrhunderten wuchs die Weltbevölkerung von einer halben auf sieben Milliarden Menschen an (Faktor 14). Der weltweite Energieverbrauch stieg dagegen um den Faktor 150, von 100 Millionen auf 15 Milliarden Tonnen Steinkohleeinheit (SKE) pro Jahr (IEA, 2008). Nach Überzeugung des Weltenergieerates wird der Weltenergiebedarf bis 2020 um weitere vier Milliarden Tonnen SKE pro Jahr zunehmen (WEC, 2013), maßgeblich beeinflusst durch das Wachstum der Weltbevölkerung von aktuell jährlich 80 Millionen Menschen auf circa acht Milliarden Menschen im Jahr 2020 (UN, 2017).

Die mit derzeitigen Methoden wirtschaftlich abbaubaren Vorräte an fossilen Energieträgern reichen bei gleichbleibendem Energieverbrauch (statische Reichweite) für Kohle noch 150 Jahre, Gas 60 Jahre und Öl noch etwa 40 Jahre (BGR, 2016). Für Deutschland wird zwar ein sinkender Energieverbrauch und damit eine Abnahme des Primärenergiebedarfs bis zum Jahr 2030 prognostiziert, dennoch wird es aufgrund des Vorratsabbaus der fossilen Energieträger eine erhebliche Veränderung im Energiemix (Energieträger zur Sicherung des Primärenergiebedarfs) hierzulande geben müssen (AEE, 2015; SCHULZ, 2005).

Durch eine Steigerung der Energieproduktivität¹ und des Ausbaus erneuerbarer Energien soll der Anteil selbiger am Bruttoendenergieverbrauch bis 2020 in Deutschland von heute circa 11 auf 18 Prozent erhöht werden (FNR, 2015). Dabei wird der Bioenergie ein erheblicher Beitrag zur Energieversorgung zugestanden (KÖHLER, 2013; BMU, 2010). Der nach Aussage des BMWi (2016) wichtigste Bioenergieträger ist Holz. Aufgrund dieser Tatsache hat sich allein der Holzbedarf für die energetische Verwendung in Deutschland seit dem Jahr 2004 mehr als verdoppelt (vgl. MÜHLENHOFF ET AL., 2017; WEIMAR ET AL., 2012). Die deutsche Bundesregierung erwartet, dass der Energieholzbedarf bis zum Jahr 2020 auf 65 bis 85 Millionen Kubikmeter pro Jahr steigt (MANTAU, 2012B; DB, 2009), wobei über 70 Prozent des Holzes aus Rohholz kommen sollen.

Parallel zum wachsenden Bedarf an Rohholz im Energiesektor entwickelt sich aufgrund eines Kapazitätsausbaus in der Holz- und Papierindustrie sowie verbesserter Absatzbedingungen ebenfalls eine verstärkte Nachfrage nach Holz in der Holzwerkstoff- und Zellstoffindustrie (DÖRING ET AL., 2017A; DÖRING ET AL., 2017B; MANTAU, 2012A; HELD ET AL., 2008; OCHS ET AL., 2007). Die Industrie profitiert hierbei von aufnahmefähigen Absatzmärkten auf dem Weltmarkt (LÜCKGE ET AL., 2008). Bisher gelten lediglich die derzeit erschlossenen Waldderbholzpote­n­ti­ale als aufgeteilt (RAMESOHL ET AL., 2006), bei der Nutzung der festen Biomasse als Energieträger ist eine Konkurrenzsituation hinsichtlich der stofflichen Nutzung dieser Rohstoffe absehbar. Die Sicherstellung einer kostengünstigen und kontinuierlichen Versorgung mit Holz stellt eine große Herausforderung für die Industrie dar (KÜHMAIER ET AL., 2007). Ohne die Schaffung eines Verdrängungswettbewerbs müssen also vorrangig Rohstoffressourcen erschlossen werden, die bisher keiner Nutzung unterliegen.

¹ Die Energieproduktivität erfasst, wie viel Bruttoinlandsprodukt (BIP) mit einer Einheit Primärenergie (PEV) „produziert“ wird. Sie wird ausgedrückt als das Verhältnis BIP/PEV. Eine steigende Energieproduktivität ist damit gleichbedeutend mit einem effizienteren Einsatz von Energie (Scholz, 1993).

Wie unter anderem die zweite Bundeswaldinventur (BWI²: 2001-2002; KÄNDLER ET AL., 2004) ausweist, stehen dieser ausgeweiteten Nachfrage durchaus entsprechende Nutzungspotentiale gegenüber. Waldrestholz und somit Schlagabraum (Äste, Wipfel, X-Holz) bilden ein Koppelprodukt im Zuge der konventionellen Holzernte. Es gilt als eines der wesentlichen Rohstoffpotentiale, um den steigenden Bedarf an Holz, resultierend aus der zunehmenden energetischen Nutzung, sicherzustellen (DROSSART ET AL., 2010; DIETER ET AL., 2001).

Bei der Bereitstellung der unerschlossenen Rohstoffquellen (Waldrestholz, Schwachholz, Feldgehölze) ergeben sich allerdings Mobilisierungshemmnisse (WENZELIDES ET AL., 2007), die eine Nutzung meistens verhindern. Insbesondere Kenntnislücken und ein Mangel an verlässlichen Kalkulationsgrundlagen für solche Nutzungssituationen, in denen aufgrund der schwachen Dimension und/oder der schlechten Qualität des Waldbestandes unerschlossene Holzreserven bereitgestellt werden sollen (CREMER, 2008), werden zum Problem. Auch die aufwendige Logistik zur Angebotssicherung von Waldrestholz, die sich weitreichend von den bisher angewendeten Arbeitssystemen, beispielsweise zur Bereitstellung von Stammholz (kurz- oder lang ausgehalten), unterscheiden kann, hat eine ausreichende Mobilisierung der vorhandenen Reserven bisher verhindert.

Des Weiteren verändert sich die Struktur der Abnehmer von Waldrestholz: So waren in der Vergangenheit meist Kleinverbraucher (Scheitholz) oder lokale Hackschnitzelheizanlagen die einzigen Bezieher von Kronenholz und dem übrigen Schlagabraum, jedoch sind durch die gestiegene Anzahl an Biomasseheizkraftwerken (SCHWEINLE, 2012; MÜLLER-LANGER ET AL., 2007) weitere Abnehmer in diesem Segment entstanden, die sich durch ihren deutlich höheren spezifischen Rohstoffbedarf von den kleinen Anlagen unterscheiden. Auch bei der Herstellung von Spanplatten wird in den letzten Jahren, den verbesserten technischen Produktionsmöglichkeiten geschuldet, der Einsatz von Waldrestholz ermöglicht (KRAUSE, 2010; JUNGE, 2008).

Um geringere Bereitstellungskosten für den weiteren Ausbau und die Nutzung von Waldrestholz im industriellen Maßstab zu erreichen, erweist es sich daher als entscheidend, die Bereitstellungsverfahren durch Erprobung neuer Techniken und Entwicklung ganzheitlicher Konzepte technisch, organisatorisch und logistisch zu optimieren.

Für die Bereitstellung von Rundholz (Stammholz, Industrieholz) stehen erprobte Verfahren für unterschiedliche Nutzungssituationen zur Verfügung. Auch können Forstbetriebe bei der Entscheidungsfindung auf eine langjährige Erfahrung und umfangreiches Datenmaterial zurückgreifen. Das Problem der Transport- und Bereitstellungskosten tritt insbesondere dort auf, wo die geringen Ladedichten des Waldrestholzes (v. a. bei Ästen) die Kosten erhöhen (HAKKILA, 2004; ANDERSSON ET AL., 2002; PATZAK, 1984A). Die Entscheidungsfindung, wann und wo Schlagabraum beziehungsweise Energieholz zu Waldhackgut verarbeitet und wie das Material transportiert und gelagert wird, stellt somit ein fundamentales Problem bei der Bereitstellung dar.

Aus diesem Grund spielte eine Nutzung von Waldrestholz als Rohstoff für die Industrie bisher eine untergeordnete Rolle: Die Bereitstellungskosten sind im Vergleich zu Sägenebenprodukten und Rinde zu hoch, so dass Letztere als günstige Alternativen eingesetzt wurden (KANZI-

AN ET AL., 2006B; STOCKINGER ET AL., 1998). Die steigende Nachfrage wirft vor allem im Hinblick auf die Bereitstellungsverfahren und die Organisation der Arbeitsabläufe neue Fragen auf.

Bisherige Studien zur Waldrestholzbereitstellung (u. a. KUPTZ ET AL., 2015; BRUNSMEIER, 2014; CREMER, 2008; WITTKOPF, 2005; LECHNER, 2005) vernachlässigten leider häufig einen ganzheitlichen Ansatz. Infolgedessen wurden wichtige Faktoren außer Acht gelassen, die bei einer industriellen Nutzung von technischer und finanzieller Bedeutung sind.

Fraglich ist, ob die Versorgungssicherheit bei einer industriellen Nutzung von Waldrestholz höher zu bewerten ist als bei einer Nutzung zur Energieerzeugung im kleinen Maßstab oder für den häuslichen Gebrauch. Insofern wäre die Versorgungssicherheit auch als Beurteilungskriterium bei der Auswahl geeigneter Bereitstellungsverfahren zu berücksichtigen. Weitere Parameter sind neben der Bevorratung auch die Vorgehensweise bei der Abrechnung mit Unternehmen und Waldbesitzern sowie die Steuerung und Überwachung der Einzelprozesse durch das Unternehmen. Die Schnittstellen zwischen Lieferanten und dem industriellen Abnehmer müssen angeglichen werden und eine Einbindung in die vorhandenen Systeme des Abnehmers sollte gegeben sein. Unter diesen Voraussetzungen sind die vorhandenen Bereitstellungssysteme neu zu bewerten: Die bekannten Arbeitsverfahren gilt es, in unterschiedlichen Kombinationen, teilweise unter Berücksichtigung innovativer neuer Verfahren, zusammenzustellen und zu untersuchen. Von entscheidender Bedeutung erweist sich dabei die Begutachtung der vollständigen Bereitstellungskette vom Schlagabraum im Wald bis zum Hackschnitzel in der Produktion.

1.2 Aufbau der Arbeit

Der Schwerpunkt der vorliegenden Arbeit fokussiert auf der Bewertung von Arbeitssystemen zur Bereitstellung von Waldrestholz für eine industrielle Nutzung. Daher ist es notwendig, die industrielle Verwendung von anderen Nutzungsformen abzugrenzen und die Prozesse, in denen Waldrestholz als Rohstoff zum Einsatz kommen kann, zu analysieren. Die Unterschiede gegenüber einer nichtindustriellen Verwendung werden dargestellt und die besonderen Anforderungen der Industrie erläutert.

Es gilt zu überprüfen, welche Anforderungen an die Qualität der Rohstoffe sowie die Bereitstellungssysteme bei der Belieferung eines industriellen Abnehmers mit Waldrestholz gestellt werden. Es sollen zudem Konzepte aufgezeigt werden, die durch ihre Produktivität, Verlässlichkeit und praktische Anwendung in besonderer Weise geeignet sind, um eine professionelle Bereitstellung für alle Marktteilnehmer zu gewährleisten.

Es ergeben sich folgende Teilaufgaben für die vorliegende Arbeit:

1. Die industrielle Verwendung von Waldrestholz wird dargestellt. Anhand von unterschiedlichen Verarbeitungsabläufen bei der Energieerzeugung und in der Holzwerkstoffherstellung benennt die Arbeit die Anforderungen an den Rohstoff. Durch konkrete Beispiele werden die theoretischen Erkenntnisse hinterfragt.
2. Es werden Arbeitssysteme, die nach aktuellem Kenntnisstand in der professionellen Waldrestholzbereitstellung zur Anwendung kommen, vorgestellt. Auf Basis von Literaturanalysen arbeitet der Verfasser wichtige Parameter zur Beurteilung der Verfahren heraus. Für weniger verbreitete Arbeitssysteme, wie die Bündlertechnologie, der Transport von Bündeln und die zentrale Zerkleinerung, werden die Daten durch praxisbegleitende Feldanalysen ergänzt.
3. Für die professionellen Arbeitsabläufe sollen geeignete Produktivitätsmodelle und Kostensätze herausgestellt werden, um konkrete Praxisbeispiele zu kalkulieren und einen Vergleich zwischen den Bereitstellungsketten für eine stationäre und mobile Zerkleinerung zu erstellen.
4. Unter Berücksichtigung der speziellen Anforderungen eines industriellen Abnehmers werden Modellszenarien für die Belieferung mit Waldrestholz erstellt. Ziel ist es, durch die modularen Produktivitätsmodelle und die konkreten Kennwerte der Praxisbeispiele die Eignung der unterschiedlichen Arbeitsabläufe unter variierenden Rahmenbedingungen festzustellen und Empfehlungen auszusprechen.

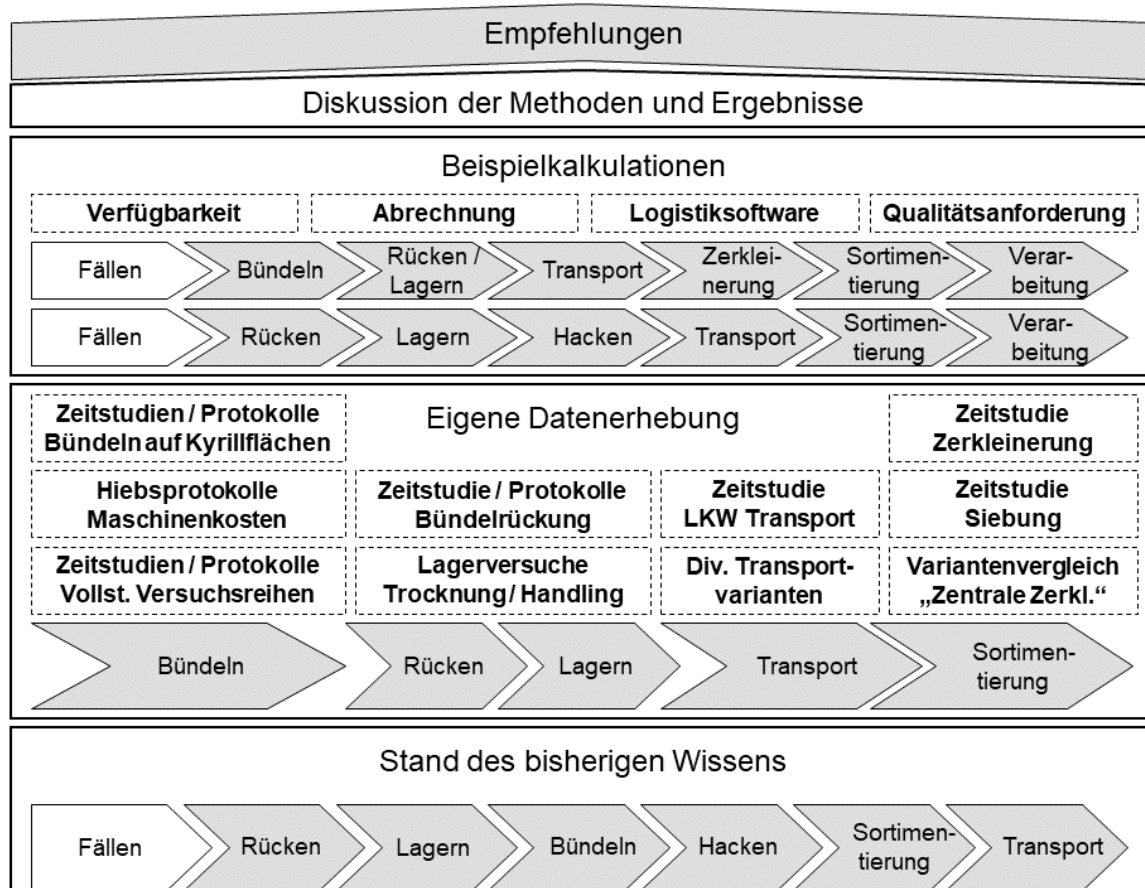


Abbildung 1: Struktureller Aufbau der Arbeit.

Abbildung 1 verbildlicht den strukturellen Aufbau der vorliegenden Arbeit. Im ersten Teil sollen der Stand des Wissens bei der Waldrestholzbereitstellung und (industriellen) -nutzung aufgezeigt und der entsprechende Forschungsbedarf identifiziert werden. Als Ergebnis der langjährigen Marktbeobachtung im Bereich Waldrestholzbereitstellung, durch Gespräche mit zahlreichen Experten aus Unternehmen im In- und Ausland und in Verbindung mit Messebesuchen (z. B. Elmia Wood 2005 & 2009 & 2013, Interforst 2006 & 2010, RENEXPO 2006, LIGNA 2007 & 2009 & 2011 & 2013, KWF Tagung 2008 in Schmallingenberg & 2012 in Bopfingen) konnten die elementaren Bereitstellungsketten herauspräpariert werden. Es zeigt sich, dass die praxisrelevanten Arbeitssysteme in der Forschung bisher nicht ausreichend berücksichtigt wurden und viele Entscheidungen der Unternehmen auf Erfahrungswerten, euphorisch wahrgenommenen Geschäftsaussichten und aus der Schlussfolgerung von politischen Willenserklärungen zum Ausbau der Energieerzeugung aus Holz beruhen. Verfahrenstechnische Probleme und Kostenkalkulationen sind in der Vergangenheit häufig falsch interpretiert worden. Als Folge mangelnder Erfahrung und wissenschaftlicher Studien werden die vorhandenen Forschungsergebnisse einzelner Module als Grundlage für die Bewertung der Praxistauglichkeit und Wirtschaftlichkeit der gesamten Bereitstellungskette herangezogen.

In einem zweiten Schritt gilt es, die gewonnenen Erkenntnisse mit Hilfe unterschiedlicher methodischer Ansätze durch eigene Datenerhebungen zu ergänzen. Die Feldversuche bilden die Grundlage, um teilweise bekannte Prozessschritte in neuer Konfiguration zu beleuchten

und vor allem ein vollständiges Bild der gesamten Bereitstellungskette zu liefern. Durch dieses Vorgehen werden die einzelnen Arbeitssysteme nicht separat, sondern als Teil der Bereitstellungskette gesehen, so dass die ausschlaggebenden Parameter, beispielsweise für die Produktivität, herausgestellt und deren Schwachstellen identifiziert werden können.

Dieses modulare Vorgehen gestattet es, zwei differente Bereitstellungsketten herauszustellen, die anschließend hinsichtlich der an sie gestellten Anforderungen und ökonomischen Aspekte anhand von Praxisbeispielen beurteilt werden können. Es sollen Produktivitätsmodelle für die unterschiedlichen Systeme entwickelt und miteinander verglichen werden. Dabei stehen verfahrenstechnische und wirtschaftliche Aspekte im Mittelpunkt der Betrachtung.

2 Stand des Wissens

2.1 Rohstoffherzeugung in der deutschen Forstwirtschaft

Um Informationen über die in Deutschland nachhaltig zur Verfügung stehenden Holzmengen zu erhalten, sollte man sich zunächst ein Bild von der Struktur der deutschen Forstwirtschaft verschaffen. Dies geschieht zum einen durch einen Blick in die regelmäßig durchgeführten Inventuren, zum anderen ist den besonderen Besitzverhältnissen und Anforderungen an den Wald Rechnung zu tragen. Bei Ersteren spielt die Bundeswaldinventur (kurz BWI / bisher dreimal veröffentlicht: BWI¹: 1986-1989, BWI²: 2001-2002 und BWI³: 2011-2012) eine gravierende Rolle. Die Bundeswaldinventur erfasst die großräumigen Waldverhältnisse und forstlichen Produktionsmöglichkeiten auf Stichprobenbasis nach einem einheitlichen Verfahren in ganz Deutschland (POLLEY ET AL., 2010). Dieses Vorgehen wird alle zehn Jahre wiederholt. In diesem Zusammenhang werden die notwendigen Daten und Fakten über den Waldbestand der Bundesrepublik Deutschland im Rahmen der Stichprobengrenzen zuverlässig erhoben (HÄRTEL, 2009).

Es hat sich gezeigt, dass Deutschland über vergleichsweise große Holzvorräte verfügt und mehr Holz nachwächst, als genutzt wird (BMEL, 2016). Anhand der Inventurdaten lässt sich ebenfalls erkennen, dass allein Fichte (28,2 %) und Kiefer (23,3 %) gemeinsam mehr als die Hälfte, der in deutschen Wäldern vertretenen Baumarten ausmachen. Die Laubwälder repräsentieren den geringeren Anteil (41,9 %) am Gesamtbestand, wobei Buche (14,8 %) und Eiche (9,6 %) am häufigsten vorkommen.

Neben den Standortbedingungen, dem Alter und Pflegezustand der Bestände hat jedoch die Baumart einen großen Einfluss auf den Zuwachs. Die Nadelbäume, insbesondere Douglasie, Fichte und Tanne weisen mit mehr als 16 Kubikmeter je Hektar und Jahr einen großen Volumenzuwachs auf (BMEL, 2016). Die Inventurdaten zeigen einen Zuwachs aller Baumarten im Hauptbestand im Durchschnitt von 12,1 Vorratsfestmetern je Hektar und Jahr. Gleichzeitig werden die Nadelbäume, hier insbesondere die Fichte, überdurchschnittlich genutzt. Dazu kommt die Abnahme der Fichtenbestände durch Umwandlung in Laubholzbestände sowie die Sturmereignisse der 1990er und 2000er Jahre, was insgesamt dazu führt, dass die Fichte den geringsten Vorratszuwachs verzeichnen kann und 87 Prozent des Zuwachses genutzt wird. In der Altersklasse bis 40 Jahre ist bei der Baumart Fichte eine Abnahme des Vorrats festzustellen. Insbesondere im Staats- und Körperschaftswald haben sich durch die intensive Nutzung und den Umbau in Laubwald- und Mischbestände die Fichtenvorräte insgesamt bereits reduziert.

Die Laubholzbestände werden derzeit nicht so stark genutzt, so dass sich bei Buchen ein Nutzungsgrad (Verhältnis Einschlag / Zuwachs) von 58 und bei Eichen von 48 Prozent ergibt. Man schlägt also insbesondere im Laubholz deutlich weniger ein, als jährlich zuwächst, so dass die Holzvorräte im stehenden Bestand in Deutschland weiter steigen. Die BWI² weist eine Zunahme der Holzvorräte im Zeitraum zwischen den Erhebungen zur ersten BWI¹ und der nachfolgenden Inventur (ca. 10 Jahre) von 55 Vorratsfestmeter pro Hektar Waldfläche in Deutschland aus. Der hohe Zuwachs und die Zunahme der Vorräte sind allerdings nicht gleichzusetzen mit der Holzmenge, die jährlich geerntet werden kann oder auf den Holzmarkt

kommt. So sind zum Beispiel Bäume, die zu den zuwachsstarken, jungen Altersklassen gehören, wegen geringer Durchmesser noch nicht erntewürdig.

2.1.1 Holzeinschlag und -verwendung in Deutschland

Die gestiegene Mengennachfrage in der ersten Verarbeitungsstufe der stofflichen und energetischen Holzverwendung, ein zeitweise attraktives Preisniveau sowie die zahlreichen Initiativen zur Rohholzmobilisierung in der Forstwirtschaft führten zu einer Einschlagserhöhung durch die deutsche Forstwirtschaft (BECKER ET AL., 2013; OCHS ET AL., 2007). So hat es seit Beginn des 21. Jahrhunderts bis zur Wirtschafts- und Finanzkrise 2008 eine kontinuierlich gestiegene Nutzungsintensität beim Waldholz gegeben. Im Jahr 2007 erreichte der offizielle Holzeinschlag in Deutschland sogar einen neuen Rekord (BALBACH, 2008; ZMP, 2007). Den Holzeinschlag in Deutschland gibt offiziell das Statistische Bundesamt im Rahmen der Holzeinschlagsstatistik aus; hiernach betrug das gesamte in Deutschland geerntete Holz im Jahre 2016 über alle Baumarten rund 51 Millionen Erntefestmeter. Mit 23,9 Millionen Festmetern schlugen allein Baden-Württemberg und Bayern annähernd 50 Prozent des Gesamtholzeinschlags (s. Abbildung 2).

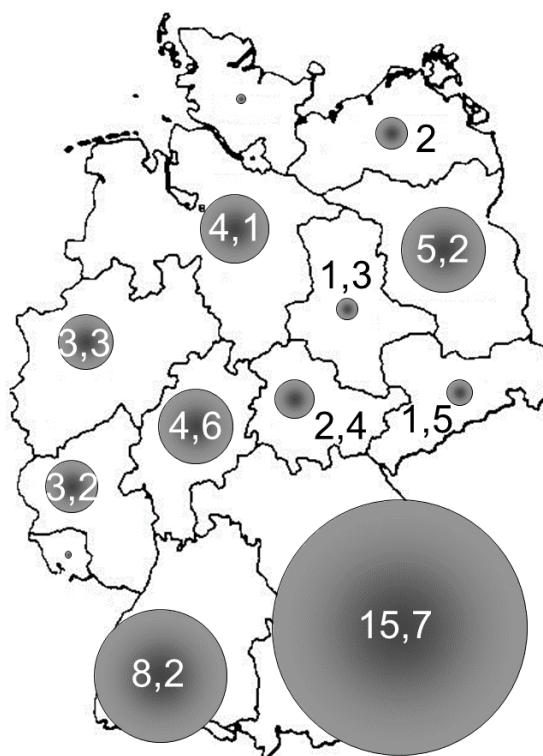


Abbildung 2: Der Holzeinschlag in den deutschen Bundesländern in Millionen Kubikmeter ohne Rinde im Jahr 2016. Eigene Darstellung auf Basis der Holzeinschlagsstatistik des Statistischen Bundesamtes (DESTATIS, 2017).

Dabei weicht das vom Statistischen Bundesamt angegebene Erntevolumen von der Holzeinschlagsmenge ab, die andere Experten im Rahmen einer Mengenabschätzung eruieren. Demnach wird die durch das Statistische Bundesamt wiedergegebene Menge häufig unter-

schätzt (DIETER ET AL., 2005), was in der Tatsache begründet liegt, dass ein Teil des Holzeinschlages durch die amtliche Statistik nicht erfasst wird. Jedoch ist die teilweise drastische Untererfassung in der Holzeinschlagsstatistik nicht ausschließlich durch methodisch unterschiedliche Herleitungen der Untersuchungen zu erklären: Vielmehr fließt das Stamm- und Industrieholz, das in der Regel durch gewerbliche Forstbetriebe an Sägewerke, die Zellstoff- oder Holzwerkstoffindustrie vermarktet wird, weitgehend korrekt in die Statistik ein. Im Gegensatz hierzu ist das Energieholz zu sehen, welches von den nicht befragten Kleinbetrieben mit unter 10 Hektar Waldbesitz veräußert wird. Man schätzt die Höhe dieser Nutzungen je nach Autor und Bundesland unterschiedlich hoch ein: So beziffert etwa MANTAU (2018) in seiner Holzrohstoffbilanz das Holzaufkommen (nur Waldholz) in Deutschland im Jahr 2016 mit circa 63 Millionen Kubikmeter Rohholz, wobei sich diese Mengen anhand des Rohstoffverbrauchs der Abnehmer ergeben. Im Gegensatz zu den Angaben des Statistischen Bundesamtes vermutet auch die Arbeitsgemeinschaft Rohholzverbraucher e. V. einen grundsätzlich höheren Holzeinschlag (AGR, 2012).

Eingeschlagen wird bundesweit vor allem Nadelholz mit einem Mengenanteil von rund 80 Prozent am jährlichen Gesamteinschlag (DESTATIS, 2017). Aufgrund des Sturmholzanfalls lag der Anteil des Nadelholzes am Gesamteinschlag zwischenzeitlich (2007) sogar bei 83 Prozent (ZMP, 2008). Das Fichtenholz macht hierbei alleine 60 Prozent des jährlichen Gesamteinschlages aus; wobei der Einschlag der deutschen Forstwirtschaft in der Holzartengruppe Fichte zwischen 2002 und 2006 um 55 Prozent zunahm. Der prozentuale Anteil der anderen Baumarten, insbesondere Laubholz, ist unter anderem wegen ihres geringeren Flächenanteils und der schwächeren Wuchseistung erheblich niedriger. Der größte Teil der Holzmasse entstammt den mittelalten Beständen zwischen 60 und 100 Jahren; insbesondere in der jüngeren Altersklasse ist aufgrund des geringen Einzelstammvolumens lediglich ein beschränkter Volumenanstieg zu verzeichnen.

Ein erhöhter Holzeinschlag ist wiederum die wesentliche Voraussetzung für eine gestiegene Holzrohstoffverwendung durch die energetische und stoffliche Nutzung (SEINTSCH, 2010). Hierbei werden etwa 80 Prozent des Nadelholzanfalls stofflich verwendet, wohingegen man nur rund 30 Prozent des Laubholzes stofflich und 70 Prozent energetisch nutzt. Der Anteil des Nadelstammholzes am Gesamtholzaufkommen bemisst sich mit 45 Prozent, während nur zwei Prozent als Laubstammholz ausgewiesen werden (SEINTSCH, 2011).

Das Maß der energetischen Verwendung von Holz unterliegt weniger konjunkturellen Schwankungen, sondern vielmehr witterungsbedingten Einflüssen und den politischen Rahmenbedingungen. Es stellt sich heraus, dass die Anzahl an mit Holz befeuerten Anlagen und damit auch der anzunehmende Verbrauch an Energieholz deutlich größer ist als erwartet: allein in Nordrhein-Westfalen befinden sich 2006 bereits mindestens 1,3 Millionen Einzelfeuerstätten, über 22 Tausend Zentralheizungen und 200 Großfeuerungsanlagen in Betrieb (WENZELIDES ET AL., 2006A). Insbesondere die Anzahl der Kleinfeuerungsanlagen wird regelmäßig unterschätzt. Nach einer Umfrage von MANTAU (2012B) nutzen in 2012 bereits 25 Prozent aller Haushalte einen Kamin, Ofen oder eine andere Feuerstätte auf Holzbasis. Nach einer Studie der FNR (AGR, 2013) beläuft sich der Gesamtbestand an Holzheizungen in privaten Haushalten sogar auf 15 Millionen Anlagen. Die privaten Haushalte sind ebenso

mit Abstand die größten Abnehmer für Energieholz: Im Jahr 2010 sollen laut DÖRING ET AL. (2016) circa 44 Millionen Festmeter Holz, davon etwa 22 Millionen Festmeter Waldscheitholz und somit 225 Prozent mehr als in 2000 von den privaten Haushalten verbraucht worden sein. Diese Zahlen belegen deutlich, dass der private Energieholzverbrauch maßgeblich zu der hohen Einschlagsmenge in Deutschland beiträgt. So überrascht es auch nicht, dass etwa 65 Prozent des gesamten Laubholzanfalls und 12,5 Prozent des Nadelholzes im privaten Hausbrand eingesetzt werden (MANTAU, 2010A).

Die Rohholznachfrage, in erster Linie im Industrieholzbereich, war Ende 2006 beziehungsweise Anfang 2007 so groß, dass es bereits zu Versorgungsengpässen in der Holzwerkstoff- und Holzzellstoffindustrie kam. Trotz der erheblichen Sturmholzmengen, die die Stürme Kyrill im Januar 2007 und Emma im März 2008 verursachten, sind die Preise für Sägerundholz sowie Industrieholz in Deutschland kaum oder nur regional gesunken und bereits ab 2010 nachfragebedingt deutlich gestiegen (BMELV, 2011; ZMP, 2008). Den größten prozentualen Preisanstieg hat in den Jahren 2005 bis 2011 das Buchenindustrieholz zu verzeichnen (vgl. Abbildung 3). Besonders die stark gestiegenen Rohstoffkosten für fossile Energieträger haben den Rohstoff Holz für die Energieerzeugung gerade auch für den Endverbraucher interessant gemacht.

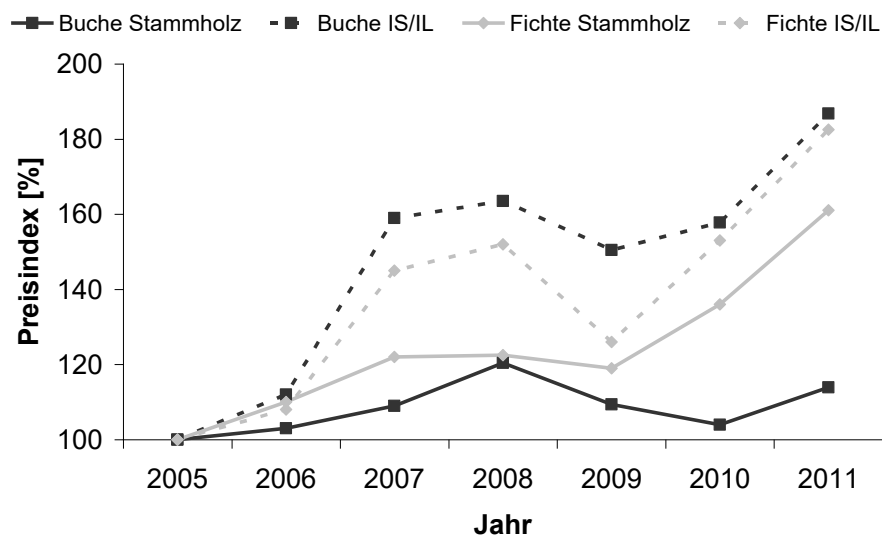


Abbildung 3: Erzeugerpreisindex forstwirtschaftlicher Produkte aus den Staatsforsten in Deutschland ohne Umsatzsteuer. Preisindex für Buchen- und Fichtenstamm- und -industrieholz. Eigene Darstellung auf Basis der Preisindizes des Statistischen Bundesamtes (DESTATIS, 2013A).

Die Nachfrage nach Energieholz ist im Gegensatz zur stofflichen Nutzung unabhängig von Wirtschaftskrisen in den letzten Jahren kontinuierlich gestiegen. Da beim energetischen Gebrauch von Holz weitestgehend auf dieselben Holzsortimente zurückgegriffen wird wie in der Holzwerkstoffindustrie, ist die Verknappung für diese Sortimente besonders durch Preis und Verfügbarkeit spürbar. Dieser Trend zeigt sich allerdings auch über alle Sortimente hinweg. Aufgrund der gestiegenen Nachfrage nach Sägerestholz durch die energetische Nutzung, kaufen Sägewerke ihr Rundholz mit einem immer geringeren Zopfdurchmesser ein (NIEDRIN-

GHAUS, 2016). Hierbei ist der Anteil von Restholz im Verhältnis zu den klassischen Sägewerksprodukten deutlich höher. Infolgedessen steigt auch die Konkurrenz im Rundholzeinkauf zwischen der Holzwerkstoff- und der Sägeindustrie (ALTEHELD, 2007).

Der Anstieg der energetischen Nutzung von Rundholz führt unweigerlich auch zu einer Rohstoffverknappung für Sägewerke und Holzindustrie. Aufkommende Proteste, insbesondere der gut organisierten und in politischen Bereichen stark vertretenen Holzindustrie, gegen eine zunehmende und subventionierte Verwendung von Holz zur Energieerzeugung finden Anklang in der Politik. So stoppten einige Bundesländer den weiteren Ausbau der Holzenergieerzeugung durch das Auslaufen von Förderprogrammen (z. B. Holzabsatzförderrichtlinie des Landes NRW) oder die Landesforstverwaltungen vergaben kein Holz für eine kommerzielle Energieerzeugung (z. B. Rheinland-Pfalz).

In Nordrhein-Westfalen versucht die Politik mit Strategiepapieren einen Weg für die Bioenergienutzung aufzuzeigen. Die Anfang 2007 formulierte erste Biomassestrategie sah eine Verdoppelung, später Vervierfachung der aus Biomasse produzierten Strom- und Wärmemengen bis 2010 beziehungsweise 2020 vor. In einem weiteren Strategiepapier (Bioenergie.2020.NRW) aus dem Jahr 2009 plant die Landesregierung, den Anteil der aus Biomasse erzeugten Energie noch über diesen Wert hinaus zu steigern. Demnach sollen von 1,9 Terrawattstunden im Jahr 2004 bis zum Jahr 2020 insgesamt circa 18 Terrawattstunden Energie aus Biomasse generiert werden. Der überwiegende Teil der Biomasse soll in diesem Fall aus forstlichen Ressourcen stammen. Um der Verknappung entgegenzuwirken und die Konkurrenzsituation gerade bei der Verwendung von holzartiger Biomasse zu entschärfen, forciert die Landesregierung die Technologieentwicklung und die Anwendung innovativer, effizienter Verfahren zur Energieerzeugung. Dabei sollen grundsätzlich solche Nutzungspfade Vorrang haben, die hohe Wertschöpfung, Arbeitsplatzeffekte und Effizienz vereinen. Es wird angestrebt, Biomasse mit geringer Transportwürdigkeit dezentral, mit einem Schwerpunkt im ländlichen Raum zu nutzen.

Die stoffliche Nutzung soll vor einer energetischen erfolgen. Klassische Holzsortimente müssen einer Kaskadennutzung² unterliegen, um von der gesamten Wertschöpfung profitieren zu können (ARNOLD ET AL., 2009). Als weiteren wesentlichen Punkt, der den Ausbau der Bioenergieerzeugung voranbringt, sieht die nordrhein-westfälische Landesregierung eine vermehrte Ausschöpfung vorhandener Biomassepotentiale.

2.1.2 Waldrestholzpotential für eine industrielle Nutzung

Für einen weiteren Ausbau der Energieerzeugung aus Biomasse sehen LEIBLE ET AL. (2003) insbesondere die biogenen Reststoffe (s. Abbildung 4) als geeignet an. Demnach entstehen die biogenen Reststoffe bei jeder Form der Verarbeitung, Veredelung und Konsumation von biogenen Rohstoffen und reichen von Obstkernen und Stroh bis hin zum Klärschlamm (vgl. Abbildung 4). Bei nachhaltiger Nutzung können biogene Reststoffe etwa fünf Prozent (NITSCH ET AL., 2004), Biomasse insgesamt (oberirdische Biomasse) bei sehr optimistischer Sicht 10

² Mehrere Nutzungsschritte (Rohstoff – Produkt – energetische Nutzung).

bis 30 Prozent (SCHINK, 2013) des jährlichen Primärenergiebedarfs in Deutschland abdecken. ARNOLD ET AL. (2006) weisen darauf hin, dass die Potentiale im Bereich holzartiger Biomasse bis auf das Waldrestholz und wenige andere Bereiche bereits erschlossen sind. Dennoch spielt insbesondere Holz eine entscheidende Rolle, wenn es darum geht, die vorhandenen Potentiale sofort umzusetzen (DROSSART ET AL., 2010).

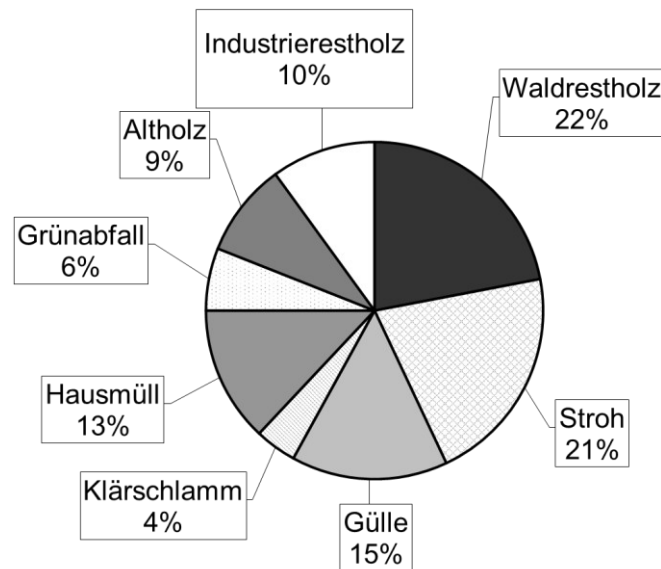


Abbildung 4: Relative Bedeutung unterschiedlicher verfügbarer Rohstoffe am Gesamtaufkommen der biogenen Reststoffe in Höhe von circa 75 Millionen Tonnen pro Jahr in Deutschland. Eigene Darstellung nach LEIBLE ET AL. (2003).

Das potenzielle Gesamtaufkommen an holzartiger Biomasse entspricht nach KALTSCHMITT (2008) circa neun Prozent (1250 PJ) des Primärenergiebedarfs in Deutschland. Tatsächlich machen die festen Brennstoffe (hauptsächlich Holz) einen Anteil von 3,5 Prozent am Primärenergieverbrauch (14 EJ) in Deutschland im Jahr 2010 aus (SCHINK, 2013). In diesem Zusammenhang wird das zu der holzartigen Biomasse gehörige Straßenbegleitgrün, welches vielfach als Hoffnungsträger für den Ausbau der Holzbiomassennutzung genannt wird, bezüglich der verfügbaren Menge wohl überschätzt und gemäß einer Studie von DOBERS (2008) auf gerade einmal 280 Tausend Tonnen organische Trockensubstanz (oTS) pro Jahr in Deutschland veranschlagt. Bei einer ausschließlich energetischen Nutzung des vollständigen Waldstammholz-Jahreseinschlags in Deutschland können gerade einmal rund drei Prozent des Primärenergiebedarfs hierzulande gedeckt werden (Stand 2013: DESTATIS, 2013E; vgl. JACKE, 2007A). Um eine Versorgung der neu entstehenden energetischen Nutzung sowie eine Teilversorgung der Holzindustrie zu gewährleisten, bedarf es somit einer weiteren Steigerung der Holzproduktion und einer nahezu vollständigen Mobilisierung der nachhaltig verfügbaren Holzreserven (JOOSTEN ET AL., 2003B).

Tatsächlich werden in Deutschland circa 20 bis 25 Millionen Kubikmeter Waldholz energetisch genutzt, was in etwa 1,5 Prozent des deutschen Primärenergiebedarfs entspricht (JOCHER ET AL., 2015; BMU, 2011A). Auf der anderen Seite weist MANTAU (2012B) für 2010 erstmals eine größere energetische als stoffliche Holzverwendung in Deutschland nach.

Ungenutzte Rohholzaufkommen werden vor allem im Bereich des Waldrestholzes gesehen, das bereits für die Energieerzeugung speziell der Haushalte (in Form von Scheitholz) oder zur Versorgung kleinerer Heizwerke (in Form von Hackschnitzeln) herangezogen wird. Insgesamt gehen die Bundesministerien für Landwirtschaft und Umwelt (BMELV und BMU) davon aus, dass aufgrund der vielfältigen Anstrengungen, die stoffliche Holznutzung in Deutschland und Europa auszubauen, die Verwendung forstwirtschaftlicher Reststoffe (Waldrestholz) für die energetische Nutzung zukünftig noch mehr an Bedeutung gewinnen wird (BMU, 2011B; BMELV, 2010). Modellrechnungen haben Reserven für eine Ausweitung der allgemeinen Holznutzung ermittelt, ohne dass die Nachhaltigkeit der Waldbewirtschaftung gefährdet wird. Insgesamt werden die Reserven für eine energetische Nutzung (v. a. Laubholz und Waldrestholz) auf eine Größenordnung von 12 bis 19 Millionen Kubikmeter pro Jahr (ca. 65-116 PJ, entspricht ca. 0,5-0,8 % des Primärenergiebedarfs 2011) geschätzt (NITSCH ET AL., 2012).

Das BFH³ gibt das Potential an Energieholz für Deutschland mit circa 16,5 Millionen Tonnen oTS pro Jahr an (vgl. BECKMANN, 2006; DIETER ET AL., 2001). Dieses gliedert sich in knapp sieben Millionen Tonnen oTS Schwachholz und 9,5 Millionen Tonnen oTS Waldrestholz pro Jahr. Der Anteil von Waldrestholz am Energieholzpotential erweist sich damit als deutlich höher als derjenige von Schwachholz (SEINTSCH, 2007). Unterstellt wird dabei, dass man sämtliches Rohholz, das nachwächst, einschlägt und dementsprechend viel Waldrestholz anfällt. SCHAPER ET AL. (2009) beziffern die Menge des verfügbaren Waldrestholzes für Deutschland dagegen auf 16,5 Millionen Tonnen oTS pro Jahr. Bei weiteren Potentialabschätzungen (ÖKOINSTITUT, 2004) wird der geringere, tatsächliche Nutzungssatz berücksichtigt, wobei man das Waldrestholzpotential an den faktischen Rohholzeinschlag von nur etwa 67 Prozent des jährlichen Zuwachses koppelt (vgl. DIETER, 2002; Stand 2000). Demnach kann man eine Steigung für die Ausnutzung des Rohholzpotentials auf 78 Prozent im Jahr 2030 prognostizieren. Entsprechend wird das Potential an Waldrestholz im Jahr 2010 mit 4,73 Millionen Tonnen oTS pro Jahr deutlich niedriger angegeben.

Um die Möglichkeiten zur energetischen Nutzung von Waldrestholz in Nordrhein-Westfalen beurteilen zu können, werden zunächst die Daten der Landeswaldinventur (LWI) und der Bundeswaldinventur (BWI²) verwendet. Demzufolge ergibt sich ein theoretisches Potential für holzartige Biomasse (Schwachholz, verwertbares Kronenholz, X-Holz, Schadholz, Reisigmaaterial) von rund 1,8 Millionen Tonnen oTS pro Jahr, einen Schwerpunkt auf das Laubholz legend. Dieses Potential setzt sich zu zwei Dritteln aus Derbholz und zu einem Drittel aus Reisig zusammen (WENZELIDES ET AL., 2006A). Ähnliche Ergebnisse liefert das Wuppertalinstitut bei der Ermittlung des Biomassereststoffpotentials: Das Institut sieht die Reststoffe weitestgehend aufgeteilt und bereits einer Verwendung zugeführt; lediglich beim Schwachholz und beim Waldrestholz sind ungenutzte Potentiale in NRW vorhanden (ARNOLD ET AL., 2006).

Die Mobilisierung dieses Potentials wird jedoch unter anderem durch die in diesem Durchmesserbereich hohen Bereitstellungskosten, entsprechend dem Stück-Volumen-Gesetz,

³ Die Bundesforschungsanstalt für Forst- und Holzwirtschaft (BFH) war eine Forschungseinrichtung des Bundes mit Sitz in Hamburg. Sie wurde zum 1. Januar 2008 in das neu geschaffene Johann Heinrich von Thünen-Institut (vTI) eingegliedert (THÜNEN-INSTITUT, 2013).

verhindert. Der erntekostenfreie Erlös für die Erzeugung von Waldhackschnitzeln im Laub(schwach)holz ist gering oder sogar negativ, daher wirtschaftlich uninteressant für die Waldbesitzer (JOOSTEN ET AL., 2003A). Bisher übliche Verfahren zur Bereitstellung von Waldhackschnitzeln weisen zum Teil logistische Probleme auf, da es sich um prozesskettenabhängige Systeme handelt. Die Waldhackschnitzelgewinnung bedarf eines hohen Planungsaufwands, damit die Kapazitäten der Containerfahrzeuge und die Hackerleistung aufeinander abgestimmt sind. Darüber hinaus bewirken Platzmangel auf der Waldstraße (Hacker, Abfuhrcontainer) und Lagerprobleme des gehackten Materials, dass die Kosten für diese Technik und deren Einsatz in der Praxis hoch sind.

Obwohl in den zahlreichen Potentialstudien teilweise eine große Menge verfügbarer Biomasse ausgewiesen wird, hat unter anderem die Zunahme der energetischen Nutzung von Holz in Deutschland zu einem deutlichen Preisanstieg von holzartiger Biomasse geführt (AFC, 2015; VORHOLT, 2010). Daher stellen die auf Grundlage der Potentialanalysen ermittelten Holzmengen einen theoretischen Wert dar. Durch naturale, administrative, soziologische, technische sowie wirtschaftliche Mobilisierungshemmnisse wird dieses Potential in der Praxis allerdings deutlich reduziert (WENZELIDES ET AL., 2007). Das vorhandene, nachhaltig nutzbare Potential im Wald ist häufig geringer als den Erwartungen durchgeführter Potentialstudien gemäß (DBFZ, 2015). Die hieraus abgeleiteten Möglichkeiten zur Erschließung zusätzlicher, theoretischer Nutzungsreserven müssen durch quantifizierbare Mobilisierungshemmnisse relativiert werden (WENZELIDES ET AL., 2006B).

2.2 Industrielle Verwendung von Waldrestholz

2.2.1 Definition

Ein Maßstab zur Abgrenzung der industriellen von der privaten beziehungsweise gewerblichen nichtindustriellen Nutzung wird in der Regel im Umfang der Holznutzung festgelegt. Nach RÖSER (2009) werden bei der Energieerzeugung aus Holz die Holzabnehmer je nach Kesselgröße (in thermischer Leistung kW oder MW) zusammengefasst. Übertragen auf deutsche Verhältnisse ergibt sich die folgende, in Tabelle 1 dargestellte Klassifizierung:

Tabelle 1: Einteilung der Heizkessel nach ihrer Feuerungswärmeleistung.

Feuerungswärmeleistung	Einheit	Bezeichnung
5 – 20	kW	Hausbrand (Domestic)
21 – 1000	kW	Heizanlagen (Small Scale)
1 – 100	MW	Heiz(kraft)werke (Large Scale)

Die Ergebnisse legen nahe, von einer industriellen Nutzung von Holz im Rahmen dieser Arbeit ab einer Heiz(kraft)werksgröße von einem Megawatt Feuerungswärmeleistung zu sprechen.

Die Industrie (Holzwerkstoff- und Papierherstellung) bezieht seit jeher Rundholz (Industrieholz) als Rohstoff für ihre Produktion. Bei einer stofflichen Verwendung von Waldrestholz in der Papier- und Zellstoffproduktion sowie in der Holzwerkstoffindustrie ist nicht nach der Größe zu unterscheiden, denn eine Einteilung ist, anders als bei der Energieerzeugung, nicht notwendig. Die Herstellung erfolgt ausschließlich im industriellen Maßstab. Jedoch ist fragwürdig, ob der Rohstoff Waldrestholz in konfektionierter Form den Betrieben zur Herstellung von Papier und Holzwerkstoffen in qualitativer Hinsicht genügt.

Ungeachtet dessen werden in der Holzwerkstoff- und Papierindustrie große Restholzmengen für die Gewinnung von elektrischer Energie und Prozesswärme eingesetzt, so dass für Außenstehende nicht zu unterscheiden ist, ob die Waldresthölzer thermisch oder stofflich verwertet werden. Im Folgenden wird davon ausgegangen, dass die Betriebe hinsichtlich ihrer logistischen Abläufe diesbezüglich keine Unterschiede machen.

2.2.2 Die stoffliche Nutzung

Nach CARUS ET AL. (2010; S. 10) definiert sich der Begriff der „stofflichen Nutzung“ von Biomasse generell wie folgt:

„Bei der stofflichen Nutzung dient die Biomasse als Rohstoff für die Produktion von Gütern jeglicher Art [...] sowie der direkten Verwendung in Produkten. Sie wird damit von der energetischen Nutzung abgegrenzt, bei der die Biomasse allein der Nutzung als Energieträger dient.“

Im Bereich der stofflichen Verwendung von Industrie- und Waldrestholz kommt die Holzbeziehungsweise Zellstoffproduktion sowie die Holzwerkstoffindustrie in Betracht. RASCHKA ET AL. (2012) sehen diese Wirtschaftsbereiche als die mengenmäßig wichtigsten Verwender von Industrie- und Waldrestholz an. Auch wenn nach MANTAU (2012A) die energetischen Verwender von Holz den größten Anteil für sich beanspruchen, ist die Bedeutung der Holzindustrie als Arbeitgeber sowie als Holzabnehmer unbestritten.

Allein die Holz- und Zellstoffindustrien beschäftigten 2012 in rund 160 Betrieben⁴ fast 40 Tausend Mitarbeiter und erwirtschafteten einen Umsatz von über 15 Milliarden Euro im Jahr. Sie stellten jeweils mehr als 1,5 Millionen Tonnen Holz- und Zellstoff für die Produktion von knapp 23 Millionen Tonnen Papier, Pappe und Karton her (DESTATIS, 2013B). Damit ist Deutschland der größte Papierproduzent in Europa. In den letzten Jahren wurden erweiterungsfähige Standorte massiv ausgebaut, hingegen schloss man andere, an denen keine Erweiterung möglich war, teilweise gänzlich. In der Summe resultiert aus diesen Veränderungen seit dem Jahr 2000 ein Mehrbedarf an Rohstoff von etwa vier Millionen Kubikmetern pro Jahr. Hiervon trägt der Ausbau des Zellstoffwerks in Stendal allein drei Millionen Kubikmeter bei. Somit wurden im Jahr 2011 knapp elf Millionen Kubikmeter Waldholz sowie Reststoffe aus der Sägeindustrie eingesetzt (MANTAU, 2012A; VDP, 2011). Mit etwa 60 Prozent stellt Industrieholz dabei den bedeutendsten Faserrohstoff dar (MANTAU, 2012B). Für die Herstellung wird das Holz in seine Fasern zerlegt, was einerseits durch mechanische, andererseits

⁴ Davon sechs Standorte der Zellstoffherzeugung und 13 Standorte der Holzstoffherzeugung (VDP, 2011).

durch chemische Verfahren möglich ist. Im ersten Fall gewinnt man Holzstoff, im zweiten entsteht Zellstoff (BARTELS, 2011).

Neben dem Kapazitätsausbau hat es gleichzeitig intensive Kosteneinsparungsprogramme in der Zellstoffindustrie gegeben, die vor allem die Bereiche Transport und Materialbeschaffung betreffen. Durch den Bau eigener (Heiz)Kraftwerke wurde zudem eine gewisse Unabhängigkeit gegenüber den Energieversorgern geschaffen.

Zur Holzwerkstoffindustrie zählen Holzfaser-, Spanplatten-, OSB⁵ und Massivholzplattenhersteller sowie Furnier- und Sperrholzerzeuger. Die deutsche Holzwerkstoffindustrie ist im Zeitraum zwischen 2000 und 2007 ebenfalls geprägt von großen Investitionsmaßnahmen: Es wurden immer umfänglichere Produktionslinien gebaut (vor allem in den neuen Bundesländern) und bestehende Anlagen weiter vergrößert beziehungsweise optimiert. Dies führte zum Aufbau großer Anlagen mit einem Holzbedarf von jeweils 0,5 bis eine Millionen Tonnen (atro) pro Jahr (PÖYRY, 2007) – Investitionen, die nötig waren, um auf dem globalen Markt bestehen zu können. Heute sind die Anlagen technisch und technologisch ausnehmend ausgefeilt und weisen hohe Verfügbarkeiten auf: Die deutschen Produktionsstandorte sind technisch weltweit führend (MICHANICKL, 2008). Durch den Ausbau der Anlagen ist es aber auch zu einer zunehmenden Konzentration auf wenige große Hersteller gekommen („Big Five“ – EGGER, GLUNZ, KRONO-GROUP, PFLEIDERER, NOLTE).

Insgesamt erwirtschafteten im Jahr 2011 in Deutschland 40 Betriebe mit rund 12 Tausend Beschäftigten einen Umsatz von etwa 4,5 Milliarden Euro. Bedingt durch die Finanz- und Wirtschaftskrise seit 2008 kam es zu einem Kapazitätsabbau, insbesondere in der Spanplattenproduktion. Die Herstellung dieses Produktes ging von über acht Millionen in 2007 auf etwa 5,7 Millionen Kubikmeter in 2011 zurück (DESTATIS, 2013B; VHI, 2012; MANTAU, 2010B; vgl. Abbildung 5).

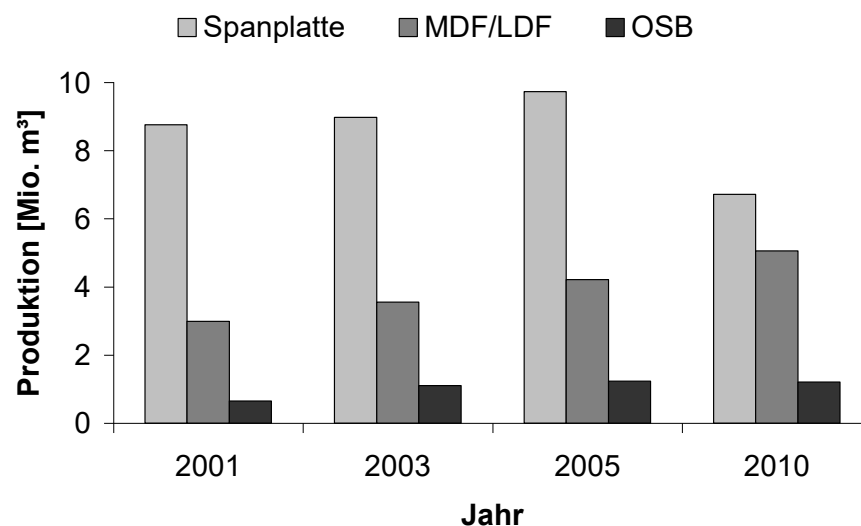


Abbildung 5: Produktionsvolumen der Holzwerkstoffindustrie in Deutschland. Eigene Darstellung nach MANTAU (2010B) für das Jahr 2010; EPF (2006); RÖDER (2006) für die Jahre 2001 bis 2005.

⁵ Grobspanplatten (englisch: Oriented Strand Board / Oriented Structural Board) sind Holzwerkstoffe, die aus langen, schlanken und ausgerichteten Spänen hergestellt werden (RENZ, 2008).

Für die Herstellung von Holzwerkstoffen stieg der Holzverbrauch bis 2007 kontinuierlich an und war zuletzt mit 24 Millionen Kubikmeter viermal so hoch wie im Jahr 1987 (MANTAU, 2012A). In 2010 benötigte man jährlich etwa 17 Millionen Kubikmeter Holz. Bei der Produktion werden Waldhölzer, Sägenebenprodukte und Gebrauchthölzer verwendet (DESH, 2012; MARUTZKY, 2000), woraus sich hinsichtlich der Rohstoffzusammensetzung in der Holzwerkstoffindustrie ein ähnlich differenziertes Bild wie bei der Holzschliff- und Zellstoffindustrie ergibt.

Durch unterschiedliche Einflussfaktoren hat es in den letzten Jahrzehnten immer wieder Veränderungen beim Holzeinsatz in der Spanplattenproduktion gegeben: Zunächst war das Waldholz der wichtigste Rohstoff bei der Spanplattenherstellung. Die Holzreste aus der Sägeindustrie stellen ebenso seit jeher einen zentralen Bestandteil in der Rohstoffzusammensetzung, deren Anteil durch den Einsatz der Profilerspanertechnologie in den Sägewerken drastisch gesteigert wurde, dar. So machte 1990 der Anteil des Industrierestholzes 71 Prozent an der Rohstoffzusammensetzung der Spanplatte aus (NIEMZ ET AL., 2012), bis in den 1990er Jahren, bedingt durch technische Entwicklungen, der Einsatz von Altholz ermöglicht wurde. Der Anteil von Gebrauchtholz konnte 2010 auf circa 23 Prozent gesteigert werden (s. Abbildung 6), was auf die deutlich niedrigeren Preise für Altholz, verglichen mit den übrigen Rohstoffen, zurückzuführen ist (RÜMLER, 1998). Seit Anfang des 21. Jahrhunderts kommt es durch Veränderungen in der Abfallablagereungsverordnung (AbfAbI VO) sowie in der TA Siedlungsabfall (TASi) und dem darin festgelegten Verbot zur generellen Deponierung von Siedlungsabfällen auch zu einer Verwendung von holzigen Reststoffen aus Siedlungsabfällen (RADDE, 2006).

Trotz der zunehmenden Konkurrenz auf dem Alt- und Industrierestholzmarkt⁶ wird versucht, den Waldholzanteil am Rohstoffmix durch technologische Entwicklungen kontinuierlich weiter zu reduzieren. Für einige Spanplattenwerke ist es heutzutage technisch sogar möglich, ganz auf Waldholz zu verzichten; jedoch greift man in der Praxis weiterhin aus politischen Gründen und zur Versorgungssicherheit auf eine Mindestmenge an Waldholz zurück (ALTEHELD, 2008).

Bei anderen Produktgruppen der Holzwerkstoffindustrie ist der Waldholzanteil hingegen deutlich höher: Für die Faserplatten⁷ wird knapp die Hälfte des benötigten Rohstoffs und für OSB der gesamte Rohstoff in Form von Waldholz verbraucht (s. Abbildung 6). Hinzu kommt, dass die Produktion dieser neuartigen Produkte, anders als bei der Spanplatte und dem klassischen Furnier-Sperrholz, kontinuierlich angestiegen ist (NIEMZ ET AL., 2012). Dieser Tatsache geschuldet und weil Sägeresthölzer immer häufiger einer energetischen Nutzung zugeführt werden (bspw. bei der Pelletproduktion), ist insgesamt von einer Zunahme des Waldholzverbrauchs in der Holzwerkstoffindustrie in den letzten Jahren zu sprechen.

⁶ Durch die verstärkte energetische Verwertung von Altholz als Folge des EEG wird der Altholzmarkt zunehmend zum Nachfragemarkt.

⁷ Auch MDF-Platte; mitteldichte Faserplatte.

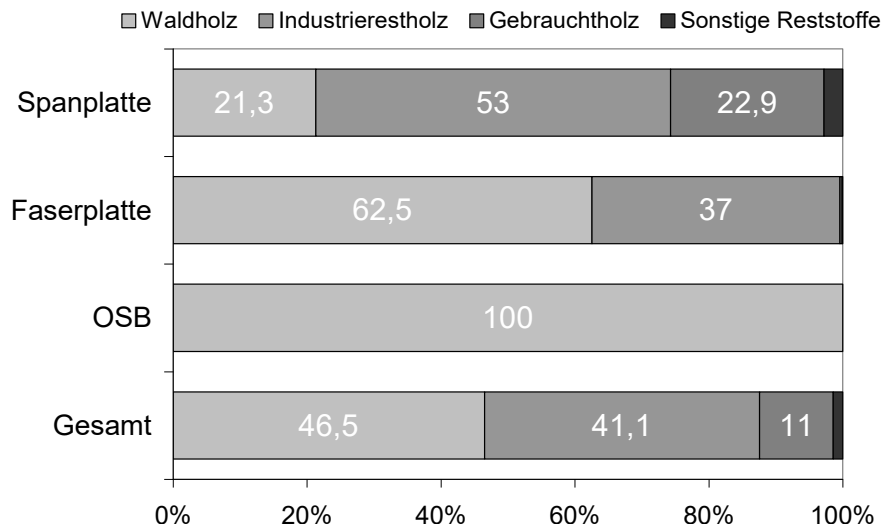


Abbildung 6: Rohstoffquellen der Holzwerkstoffindustrie in Deutschland 2011. Faserholzanteil der verschiedenen Herkünfte am Rohstoffmix. Eigene Darstellung nach Ergebnissen von MANTAU (2012A); MARUTZKY (2000).

Durch die wachsende Konkurrenz von energetischen Produzenten (z. B. Pelletwerke) und die verstärkte energetische Verwertung von Altholz, als Folge der steigenden Preise für fossile Energieträger und der positiven energiepolitischen Rahmenbedingungen in Deutschland, kommt es zu Holzverknappungen und erhöhten Holzpreisen. Der Altholzmarkt ist zunehmend zum Nachfragemarkt geworden. Anstelle von Zuzahlungen an den Verwerter von Altholz sind mittlerweile Bezugskosten zu kalkulieren (EUWID, 2012; MÜLLER-LANGER ET AL., 2006). Man kann also durchaus davon sprechen, dass die Expansion der Holzwerkstoffindustrie in Deutschland durch Rohstoffmangel (Holz) gebremst wird (ALTEHELD, 2007; MICHANICKL, 2007).

Die Technik für die Holzlogistik und -aufbereitung hat einen bedeutenden Anteil an den Investitionskosten und dem wirtschaftlichen Erfolg eines Holzwerkstoffwerkes inne. Bis ungefähr Ende der 1990er Jahre begriff man für die Produktion von Holzwerkstoffen Einzugsradien von maximal 100 Kilometer, um ein Werk als wirtschaftlich (Durchschnitt bei ca. 35 km) einzustufen. Ein gebrochener Transport von Holz war aus Kostengründen undenkbar. Heute erfolgt die Versorgung einzelner Werke zum Teil aus ganz Europa oder weltweit mit mehrfach gebrochenem Transport. Allerdings kommt den Transportkosten neben den reinen Holzkosten eine sehr große und zunehmend kritische Bedeutung zu, so dass die Rohstoffbeschaffung mehr denn je im Fokus der Holzverarbeitenden Industrie steht und zudem den Einsatz neuer Sortimente gestattet (MICHANICKL, 2007).

2.2.3 Kostenstruktur der Holzwerkstoffindustrie

Nach einer Studie von SEINTSCH (2011), in der die Kostenstruktur im Holzgewerbe auf Basis von Daten des Statistischen Bundesamtes analysiert wird, ist der Produktionszweig der Furnier-, Sperrholz-, Holzfasern- und Holzspanplattenhersteller von einem geringen Bruttoproduktionsgewinn geprägt. Dieser beträgt etwa 43 Millionen Euro bei einem Bruttoproduktions-

wert von 5,2 Milliarden Euro im Jahr 2006, beziehungsweise 0,8 Prozent vom Bruttoproduktionswert⁸. Anhand der Umsatzrendite können Rückschlüsse auf die Abschätzung der Marktsituation in der Branche gezogen werden. So kann die niedrigere Umsatzrendite in 2006 auf eine Überkapazität der Branche und somit auf eine wettbewerbsintensive Marktsituation hindeuten (SIEGWART ET AL., 2010). Bei sich ändernden Marktbedingungen, wie der Rohstoffpreisentwicklung, reagieren Branchen mit einer niedrigen Umsatzrendite äußerst empfindlich (SEINTSCH, 2011). Die deutliche Abnahme der Herstellung von Holzwerkstoffen zwischen 2006 und 2011 (DESTATIS, 2013B; VHI, 2012) ist damit auch auf die wirtschaftliche Situation der Hersteller zurückzuführen. In anderen Industriezweigen des Holzgewerbes können höhere Gewinne realisiert werden; so beträgt beispielsweise der Anteil des Gewinns am Produktionswert in der Säge- und Hobelindustrie fast sieben Prozent.

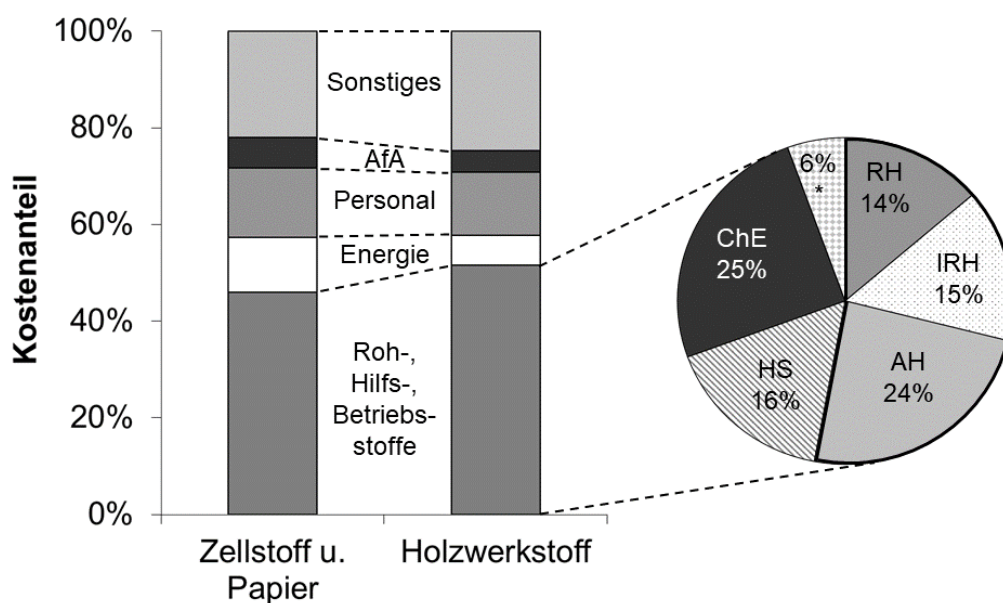


Abbildung 7: Kostenstruktur der Hersteller von Holzplatten, Zellstoff und Papier (links) sowie von Furnier-, Sperrholz-, Holzfaser- und Spanplatten (rechts). Nähere Spezifizierung der Rohstoffkosten in der Spanplattenherstellung (Tortendiagramm); wobei RH = Rohholz; IRH = Industriestholz; AH = Altholz; ChE = Chemische Erzeugnisse; HS = Holz, Zellstoff, Papier, Pappe, Karton; *Sonstiges. Eigene Darstellung, Daten aus DESTATIS (2013B) und SEINTSCH (2011).

Die Kosten für Roh-, Hilfs- und Betriebsstoffe in der Holzwerkstoffindustrie machen mehr als 50 Prozent des Bruttoproduktionswerts aus (s. Abbildung 7). Dieser hohe Wert wird lediglich von den Sägewerken übertroffen, bei denen der Rohstoffeinsatz bei 55 Prozent liegt. Bei den Herstellern von Holzwerk-, Zellstoff und Papier beläuft sich der Anteil der bezogenen Rohstoffe, aufgrund der hohen Energiekosten, gemessen am Produktionswert auf circa 44 Prozent. Wertet man die Daten des Statistischen Bundesamtes aus, wird ebenfalls ersichtlich, dass die Kosten für den Holzbezug (Wald, Industriest- und Altholz) etwa mit 50 Prozent der Rohstoffkosten und 25 Prozent vom Produktionswert zu kalkulieren sind. Einen ähnlichen Wert

⁸ Der Bruttoproduktionswert ist der Umsatz zuzüglich selbst erstellter Anlagen unter Berücksichtigung der Bestandsveränderung an unfertigen und fertigen Erzeugnissen aus eigener Produktion. Der Anteil des Bruttoproduktionsgewinns am Bruttoproduktionswert ist mit der Bruttoumsatzrendite gleichzusetzen (DESTATIS, 2013E).

gibt MICHANICKL (2008) an, der die Holzkosten mit circa einem Drittel der Herstellungskosten der Spanplatte beziffert. Auffallend ist, dass chemische Erzeugnisse, also die Kleb- und Bindstoffe in der Spanplatte, fast 25 Prozent der Rohstoffbezugskosten und damit mehr als der Bezug von Altholz ausmachen.

2.2.4 Die energetische Nutzung

In den letzten Jahren ist ein zunehmendes Interesse der Energiewirtschaft an der Verstromung fester Biomassen zu beobachten. So stellen im Vergleich zum Bestand des Jahres 2000 überregionale und regionale Energieversorgungsunternehmen sowie Stadtwerke die Betreibergruppe mit den höchsten Zuwächsen an Biomasse(heiz)kraftwerken dar (C.A.R.M.E.N., 2007). Durch Unternehmen der Energieversorgungsbranche wurden insbesondere Anlagen über fünf Megawatt elektrische Leistung errichtet. Finanzinvestoren bevorzugen den mittleren bis großen Leistungsbereich, wohingegen die Holz- und Papierindustrie ausschließlich Anlagen mit mehr als fünf Megawatt seit 2000 installiert hat. Zu Letzteren zählen allein vier Papierfabriken (Stendal, Blankenstein, Schwedt, Schongau) mit einer installierten elektrischen Leistung von etwa 160 Megawatt, die allerdings nicht vollständig den Regularien des EEG unterliegen (SAUTER ET AL., 2012). Dagegen weisen die durch sonstige gewerbliche Unternehmen sowie durch Betriebe der Land- und Forstwirtschaft errichteten Biomasseheiz(kraft)werke bezüglich der Anlagengröße eine weitgehende ‚Gleichverteilung‘ auf. Somit werden durch diese Betreibergruppen auch vergleichsweise viele Kleinanlagen betrieben (SCHOLWIN ET AL., 2011).

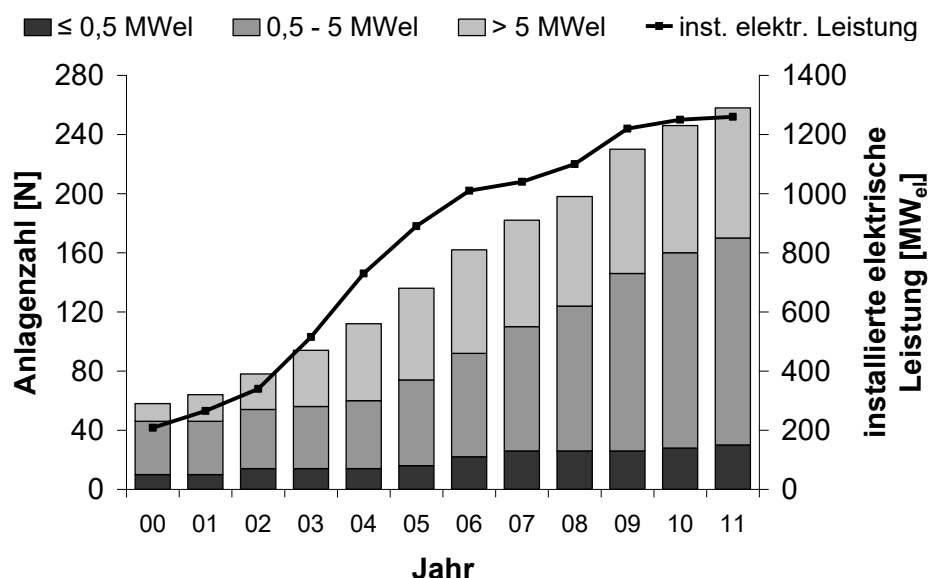


Abbildung 8: Anlagenbestand nach Größenklassen und installierte elektrische Gesamtleistung aller Biomasse(heiz)kraftwerke in Deutschland in den Jahren 2000 bis 2011. Berücksichtigt sind ausschließlich Anlagen, die eine Vergütung nach dem EEG erhalten. Eigene Darstellung auf Basis der Daten von DBFZ (2012).

Es wird deutlich, dass sich in den Jahren 2000 bis 2011 die Anzahl der Biomasseverstromungsanlagen auf Festbrennstoffbasis mehr als verfünffacht hat (s. Abbildung 8). Besonders

augenfällig ist der Anstieg des Anlagenbestands bei den industriellen Anlagen: Allein in den Jahren 2004 bis 2006 wurden etwa 60 neue Biomasseheizkraftwerke in Deutschland in Betrieb genommen, darunter 13 Anlagen mit einer installierten elektrischen Leistung von 20 Megawatt elektrisch. Der Anteil der Anlagen, die kleiner oder gleich 0,5 Megawatt elektrischer Leistung sind, ist mit rund einem Prozent am gesamten Zubau in diesem Zeitraum vernachlässigbar gering (MÜLLER-LANGER, 2007). Nachdem zuletzt im Jahr 2009 ein erheblicher Zuwachs an Anlagen zu verzeichnen war, stagnierte die Neuinbetriebnahme in jüngster Vergangenheit insbesondere bei den großen Anlagen über fünf Megawatt. Im Jahr 2012 sind allerdings noch einmal Biomassekraftwerke mit einer elektrischen Leistung von insgesamt mehr als 80 Megawatt in Deutschland neu eingesetzt worden (DÖRR ET AL., 2013). Für den weiteren Ausbau der Biomassekraftwerke ist erstens die politische Entwicklung maßgeblich, zweitens spielt die Situation auf dem Brennstoffmarkt eine erhebliche Rolle und drittens gewinnen seriöse Finanzierungs-, Versorgungs- und Wärmekonzepte bei der zukünftigen Neuinstallation von Holz(heiz)-kraftwerken an Bedeutung. Aufgrund der Zuspitzung auf dem Brennstoffmarkt ist mit vergleichbar großen Wachstumsraten wie bis 2009 in Deutschland in naher Zukunft nicht zu rechnen (ECOPROG, 2012).

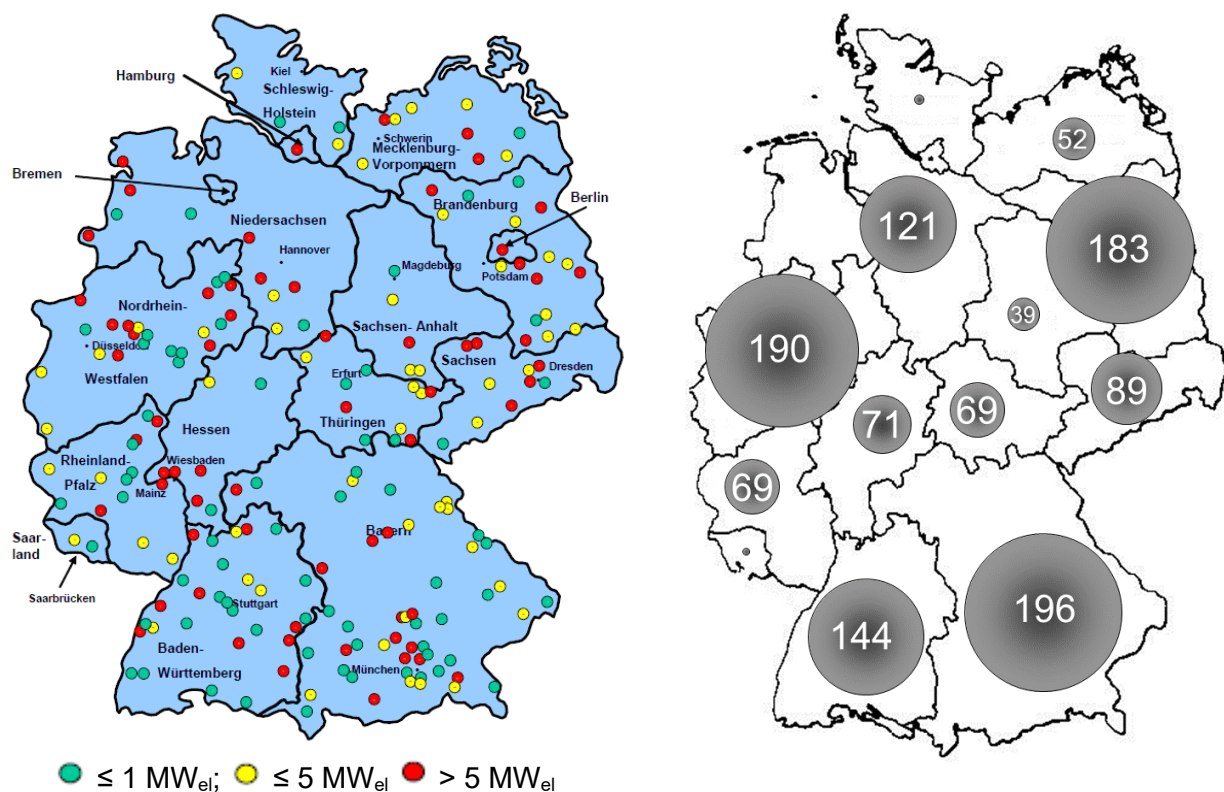


Abbildung 9: In Deutschland vorhandene Biomasseheiz(kraft)werke (links) sowie die installierte elektrische Leistung in Megawatt aller Biomasse(heiz)kraftwerke in Deutschland, aufgeteilt nach Bundesländern, im Jahr 2010 (rechts), nach DBFZ, 2012.

Aus Abbildung 9 wird die regionale Verteilung der Holzkraftwerke in Deutschland ersichtlich. Gemessen an der Anzahl der Anlagen liegt Bayern (67 Anlagen in 2011) im Bundesdurchschnitt weit vorne (DBFZ, 2012; MÜLLER-LANGER, 2007). Insgesamt sind in Nordrhein-

Westfalen Biomasseheizkraftwerke mit einer installierten elektrischen Leistung von etwa 190 Megawatt vorhanden.

Der Brennstoffbedarf aller in Deutschland betriebenen Biomasseheizkraftwerke (ohne Papierindustrie) wurde 2011 auf rund 7,8 Millionen Tonnen *atro* pro Jahr geschätzt. Dabei stellt naturbelassenes Holz die hauptsächlich eingesetzte Menge, in Höhe von bis zu 4,6 Millionen Tonnen *atro* pro Jahr, dar (DBFZ, 2012). Im Jahr 2006 war Altholz noch der mengenmäßig bedeutendste Brennstoff (MÜLLER-LANGER, 2007). Vor diesem Hintergrund betrachtet, nimmt der Anteil an Wald- und Landschaftspflegeholz somit stetig zu. Anfänglich lediglich in kleineren Anlagen zum Einsatz kommend, wird es in den letzten Jahren auch vermehrt bei industriellen Anlagen als alleiniger Brennstoff eingesetzt. Allein der namhafte Projektentwickler und Anlagenbetreiber Prolignis hat in den Jahren 2009 bis 2011 sieben Holzkraftwerke mit einer installierten elektrischen Leistung von jeweils fünf Megawatt in Betrieb genommen, die als Rohstoff ausschließlich Landschaftspflege- und Waldrestholz verwenden (PROLIGNIS, 2009).

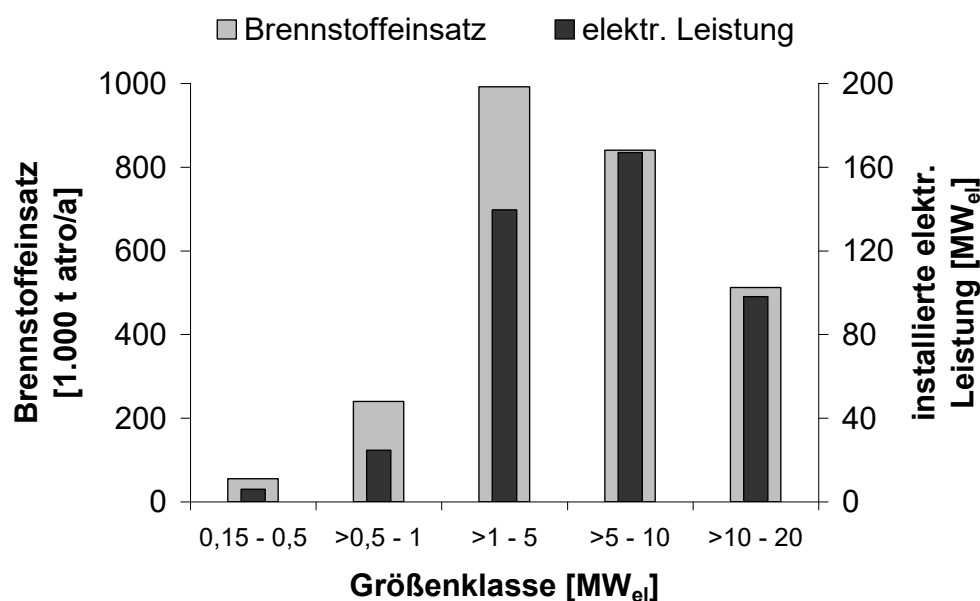


Abbildung 10: Brennstoffeinsatz von naturbelassenem Holz in unterschiedlich großen, deutschen Biomasse(heiz)kraftwerken, die ausschließlich mit naturbelassenem Holz befeuert werden. Im Vergleich dazu die gesamte installierte elektrische Leistung der ungleichen, nicht standardisierten Kraftwerksklassen im Jahr 2011 (Datenbasis aus DBFZ, 2012).

Den größten absoluten Brennstoffbedarf bei den Anlagen, die ausschließlich mit naturbelassenem Holz betrieben werden, weisen die Kraftwerke mit einer elektrischen Leistung von ein bis fünf Megawatt auf (s. Abbildung 10). Aufgrund der geringen installierten elektrischen Leistungen aller Kraftwerke, die kleiner sind als ein Megawatt, ist der Brennstoffbedarf der kleineren Werke eher gering. Bei mit Altholz befeuerten Kraftwerken haben die Anlagen, die größer sind als 10 Megawatt elektrische Leistung, den höchsten absoluten Brennstoffbedarf.

2.2.5 Kraftwerkstechnik

Für die industrielle Energieerzeugung aus Holz kommen nach aktuellem Stand der Technik vor allem Dampfkraftwerke in Betracht (SCHOLWIN ET AL., 2008). Die ebenfalls eingesetzten Verfahren der Biomassevergasung oder sogenannte ORC-Anlagen⁹ finden weitestgehend im kleineren Leistungsbereich (elektr. Nennleistung der Kraftwerke von 250-500 kW_{el}) Einsatz (KÖHLER ET AL., 2000).

Die Anlagenbestandteile bei einem Dampfkraftwerk, die die Einsatzmöglichkeit der Holzbrennstoffe beeinflussen sind im Wesentlichen der Dampfkessel mit Feuerung und die Brennstoffversorgung. Hinsichtlich der jeweiligen Auslegung der Dampfanlage unterscheiden sich diese Komponenten nur in ihrer Größe und Leistungsfähigkeit. Die relevanten Feuerungstechniken im Bereich der industriellen Waldrestholznutzung sind die Festbettfeuerung (Rostfeuerung) und die Wirbelschichtfeuerung (KNEER, 2006), die beide in großen Holzkraftwerken (Dampfkraftwerken) verwendet werden. Da die Feuerungstechnik einen deutlichen Einfluss auf den einzusetzenden Brennstoff ausübt, sollen einige Unterschiede im Folgenden verdeutlicht werden. Grundsätzlich gilt jedoch hinsichtlich des Brennstoffs, dass die Reduzierung des Wassergehalts zu einem höheren Energiegehalt des Holzes führt. Somit wird für dieselbe Heizleistung weniger trockener Brennstoff benötigt. Durch die geringere Brennstoffmenge werden damit auch die Abgasmenge und der Ascheanfall pro erzeugter Energieeinheit reduziert. Nähere Informationen sind dem Abschnitt Trocknung (vgl. Kapitel 2.4.2) sowie den Besonderheiten der unterschiedlichen Verbrennungstechniken in den folgenden Ausführungen dieser Arbeit zu entnehmen.

Rostfeuerung

Am häufigsten wird die Rostfeuerung (vgl. Abbildung 11) für Holzbrennstoffe eingesetzt (SCHEFFKNECHT ET AL., 2010). In größeren Holzkraftwerken finden sich fast ausschließlich Schrägroste, oft in Form von Treppenrosten, die mit einer Neigung von 15 bis 25 Grad im Feuerraum angeordnet sind. Der Brennstoff wird am oberen Rostende mittels einer hydraulisch betätigten und vollautomatisch regelbaren Einschubeinrichtung auf den Rost aufgegeben. Bewegliche Roststäbe sorgen dafür, dass sich die Brennstoffschicht zum unteren Rostende bewegt und dabei ausbrennt. Unterhalb des Rostendes befindet sich ein Schlacken-trichter, durch den die Schlacke schließlich in einen mit Wasser gefüllten Nassentascher niederfällt (MAYR, 2009).

Das charakteristische Prinzip eines derartigen Treppenrostes besteht darin, dass sich fixierte Roststabreihen mit beweglichen abwechseln. Die beweglichen Roststäbe schieben sich jeweils über die fixierte Reihe, wodurch der Brennstoff vorgeschoben wird und schlussendlich auf die darunterliegende Roststabreihe fällt. Um eine kräftige Schürwirkung zu erzielen, erfolgen Vorschub und Zurückziehen der Roststabreihe meist stoßartig, so dass eine Pause in der Bewegung eintritt.

⁹ Organic Rankine Cycle: ein Betriebsverfahren für Dampfturbinen ohne Wasserdampf (vgl. Drescher, 2008).



Abbildung 11: Draufsicht (links) und Seitenansicht (Mitte) eines luftgekühlten Treppenrostes; Aufnahmen vom Holzkraftwerk Domat/Ems (Ch) sowie verbrannte Roststäbe (rechts) infolge zu hoher thermischer Belastung; aus FRANZ (2009).

Nur durch eine gleichmäßige Verteilung des Holzes über die ganze Rostbreite kann die Bildung von Löchern im Feuer und damit ein unregelmäßiges Abbrennen verhindert werden. Die ansonsten entstehenden uneinheitlichen Verbrennungsabläufe können zu starker Bildung von Rauchgasemissionen, bedingt durch eine zu hohe oder zu niedrige Verbrennungstemperatur, führen.

Auf dem Rost formieren sich unterschiedliche Verbrennungszonen: Der Brennstoff durchläuft zuerst eine Trocknungszone, die bevorzugt mit vorgewärmter Verbrennungsluft versorgt wird, um eine schnelle Austrocknung und sichere Zündung der frisch zugeführten Hackschnitzel zu gewährleisten. In der sich anschließenden heißen Hauptverbrennungszone gibt man die größte Luftmenge zu; in der wieder kälteren Nachverbrennungszone wird nur noch die für einen vollständigen Ausbrand der Rückstände notwendige Luft eingeblasen. Die Verbrennungsluft wird der vorhandenen Holzart und Holzfeuchte entsprechend auf die einzelnen Rostzonen aufgeteilt. Zudem bemisst man die Rostelementgeschwindigkeit derart, dass für den vorhandenen Brennstoff die optimalen Verweilzeiten in den Trocknungs-, Entgasungs- und Ausbrandzonen des Rostes erhalten werden (MAYR, 2009; KNEER, 2006; GÖRNER, 1991).

Tabelle 2: Anforderungen der Rost- und Wirbelschichtfeuerung an den Brennstoff.

	Rostfeuerung	Wirbelschichtfeuerung
Feinanteil < 1 mm	max. 5 %	max. 20 %
Idealgröße	< 250 mm	< 50 mm
Maximalgröße	300 mm	250 mm
Sonstige Anforderung	2,2 bis 4,4 kWh/kg	einheitliche Korngröße

Für die Rostfeuerung sind vor allem Brennstoffe mit überwiegend stückiger Struktur geeignet. Es kann ein breites Spektrum an unterschiedlich großen Holzstücken verbrannt werden, so dass es auch möglich ist, sperrige Holzstücke mit zu verbrennen - sofern die Holzförder- und Dosiereinrichtungen in der Lage sind, das Material zu transportieren. Zu Problemen kommt es bei einer Rostfeuerung bei einem hohen Anteil an Feinmaterial (Unterkorn) im Hackgut, da die feinen Holzstückchen (vgl. Sägemehl) unverbrannt durch das Rost oder mit dem Abgas aus dem Feuerraum ausgetragen werden.

Dabei arbeitet das System sehr statisch: Zwar können unterschiedlichste Holzfraktionen (bspw. hinsichtlich Holzart, Feuchte und Stückigkeit) verarbeitet werden, indem man die

Feuerungsparameter entsprechend einstellt, allerdings müssen diese Parameter nachgeregelt werden, wenn sich die Brennstoffzusammensetzung verändert. Insbesondere bei sich schnell ändernder Feuchtigkeit der Holzschnitzel sind die Feuerraumtemperaturen und die Rauchgasemissionen starken Schwankungen unterworfen, die nur schwierig wieder eingeregelt werden können. Bei wechselnder Brennstoffbeschaffenheit zeigt sich der Verbrennungsprozess auf einem Rost als nur schwer beherrschbar.

Während Holz mit einem hohen Wassergehalt und niedrigem Heizwert die Verbrennung nicht behindert, können zu hohe Temperaturen im Brennraum zu Problemen führen. Aus diesem Grund darf bei einem luftgekühlten Rost der Heizwert des eingesetzten Holzes nicht oberhalb von 4,0 bis 4,5 Kilowattstunden pro Kilogramm liegen. Somit kann verhindert werden, dass die Roststäbe aufgrund zu starker thermischer Belastung durchbrennen. In Abbildung 11 (rechts) ist ein luftgekühlter Rost zu sehen, dessen Roststäbe durch die Verwendung von zu trockenem Holz und damit durch zu hohe Verbrennungstemperaturen verbrannt und infolgedessen unbrauchbar ist.

Wirbelschicht

Bei einer Wirbelschichtfeuerung wird der Brennstoff zusammen mit einem Bettmaterial von unten über einen Düsenboden von der Verbrennungsluft angeströmt. Bei ausreichend hoher Strömungsgeschwindigkeit wirbeln die Bett- und Brennstoffpartikel auf und es bildet sich eine schwebende Wirbelschicht aus. Die Schüttung aus Bettmaterial und Brennstoff befindet sich dann in einem vollständigen Schwebезustand.

Als Bettmaterial gebraucht man üblicherweise Quarzsand mit einer Korngröße von 0,5 bis 1,5 Millimeter, wobei die Sandkörner in der Wirbelschicht zermahlen werden und daher permanenter Ersatz zur Verfügung stehen muss. Der Sandverbrauch einer Wirbelschicht liegt je nach Anlage und Energiefreisetzung bei 30 bis 50 Kilogramm pro Stunde. Die abrasive Wirkung der Sandkörner sorgt zudem auch dafür, dass die Feuerraumwände der Wirbelschicht immer sauber bleiben und die von Rostfeuerungen bekannten Anbackungen und Verschlackungen des Feuerraums nicht auftreten.

Ein weiterer Vorteil der Wirbelschichtfeuerung ist, dass eine hohe Flexibilität hinsichtlich der Energiegehalte der Einsatzstoffe herrscht. Es können aufgrund der Wärmespeichermasse des inerten Sandes sowohl feuchte Rinde und Holz mit niedrigen Heizwerten eingesetzt werden als auch heizwertreiche trockene Holzstücke. Das Heizwertspektrum reicht von ca. 1,5 bis acht Kilowattstunden pro Kilogramm, wobei die Wirbelschicht insbesondere für Brennstoffe mit hohen Heizwerten geeignet ist. Der Verbrennung in der Schwebе geschuldet, wird bei gleicher Rostfläche und Feuerraumvolumen deutlich mehr Energie freigesetzt als bei einer Rostfeuerung (MEYR, 2009; KNEER, 2006; GÖRNER, 1991).

Wirbelschichtfeuerungen gelten als dynamische Verbrennungssysteme, die sowohl flexibel auf Laständerungen als auch auf wechselnde Brennstoffheizwerte reagieren. Trotz ihrer dynamischen Verbrennungseigenschaften haben Wirbelschichtfeuerungen generell höhere Anforderungen an die Brennstoffqualität als Rostfeuerungen. Der Brennstoff muss im Ver-

gleich zur Rostfeuerung feinkörniger sein und sollte vor allem eine möglichst einheitliche Korngrößenverteilung aufweisen.

2.2.6 Gesetzliche Grundlagen

Von wesentlicher Bedeutung für die Wirtschaftlichkeit eines Biomasseheizkraftwerks (Dampfkesselanlage mit nachgeschalteter Turbine zum Antrieb eines Generators) ist das Erneuerbare-Energien-Gesetz (EEG). Hiernach sind die Netzbetreiber verpflichtet, den auf diese Weise gewonnenen Strom vorrangig abzunehmen und zu vergüten.

Am 30. Juni 2011 hat der Deutsche Bundestag das „Gesetz zur Neuregelung des Rechtsrahmens für die Förderung der Stromerzeugung aus erneuerbaren Energien“ beschlossen, mit dem das EEG in seinen Grundfesten novelliert wurde. Die Novelle wurde am 04. August 2011 im Bundesgesetzblatt (BGBl. I S. 1634) verkündet und trat zum 01. Januar 2012 in Kraft (EEG, 2012). Demnach wird die Berechnung der Vergütungshöhe für die Stromeinspeisung komplett verändert: Die Grundvergütung (insbesondere für kleine Anlagen < 500 kW_{el}) wird angehoben und die bekannten Boni für ‚Kraftwärmekopplung‘ und ‚Technologie‘ entfallen. Als Ersatzleistung wird eine Mindestwärmenutzung verlangt, die im ersten Kalenderjahr nach Inbetriebnahme 25 und ab dem zweiten Kalenderjahr 60 Prozent der entsprechend der Stromkennzahl¹⁰ erzeugten Wärme beträgt. Die Vergütungsdauer beziffert man mit 20 Kalenderjahren zuzüglich des Inbetriebnahmejahres (gem. § 21 Abs. 2 EEG, 2012).

Tabelle 3: Vergütung für den Einsatz fester Biomasse bei der Stromerzeugung (EEG, 2012 / BIOMASSEV).

Bemessungs- leistung [kW _{el}]	Grundvergütung [Euro Cent / kWh _{el}]	Einsatzstoff –	
		Vergütungsklasse I [Euro Cent / kWh _{el}]	Vergütungsklasse II [Euro Cent / kWh _{el}]
≤ 75			
≤ 150	14,3	6,0	
≤ 500	12,3	5 / 2,5	8,0
≤ 750	11,0		
≤ 5.000	11,0	4 / 2,5	
≤ 20.000	6,0	-	-

Neben der Grundvergütung ist ein Aufschlag je nach verwendetem Einsatzstoff denkbar. Die Einteilung der Einsatzstoffe erfolgt in der Biomasseverordnung (BIOMASSEV, 2012). Diese regelt für den Anwendungsbereich des EEG unter anderem, welche Stoffe als Biomasse gelten und für welche Stoffe eine zusätzliche einsatzstoffbezogene Vergütung beziehungsweise in welcher Höhe sie in Anspruch genommen werden kann. Die Verordnung klärt ebenso, welche energetischen Referenzwerte für die Berechnung dieser Vergütung anzuwenden sind und wie die einsatzstoffbezogene Vergütung zu berechnen ist.

¹⁰ Die leistungsbezogene Stromkennzahl ist das Verhältnis von abgegebener elektrischer Leistung zu abgegebener Nutzwärmeleistung (SCHMITZ ET AL., 1995).

Demnach soll der Absatz von Landschaftspflegeholz und Holz aus Kurzumtriebsplantagen (sofern die zusammenhängenden Flächen < 10 Hektar u. a.) gefördert werden. Beide Kategorien klassifiziert man mit „*Einsatzstoffvergütungsklasse II*“ und vergütet deren Einsatz bei einer KWK-Anlage ($\leq 5.000 \text{ kW}_{\text{el}}$) mit 0,08 Euro pro Kilowattstunde zusätzlich. Unter „*Einsatzstoffvergütungsklasse I*“ fallen Waldrestholz und weiteres Holz, das ausschließlich für den Zweck der energetischen Nutzung angebaut wird. Industrierestholz (Sägespäne etc.) wird nicht über die Grundvergütung hinaus gefördert. Einen detaillierten Überblick über die Vergütung beim Einsatz fester Biomasse zur Energieerzeugung liefert Tabelle 3.

Die Umweltauflagen sind ebenfalls in der Biomasseverordnung (§ 5.1 BiomasseV) festgelegt: Danach sind „[...] zur Vermeidung und Verminderung von Umweltverschmutzungen, zum Schutz und zur Vorsorge vor schädlichen Umwelteinwirkungen und zur Gefahrenabwehr sowie zur Schonung der Ressourcen und zur Sicherung des umweltverträglichen Umgangs mit Abfällen die für die jeweiligen technischen Verfahren sowie den Einsatz der betreffenden Stoffe geltenden Vorschriften des öffentlichen Rechts einzuhalten“. Diese Vorschriften finden ihren Niederschlag in den Bundesemissionsschutzgesetzen, deren Einhaltung direkten Einfluss auf die Höhe der Investitionskosten für ein BMHKW ausübt.

Nach dem Bundes-Immissionsschutzgesetz (BImSchG, 2013) bedürfen Anlagen einer Genehmigung, die aufgrund ihrer Beschaffenheit oder ihres Betriebes in besonderem Maße geeignet sind, schädliche Umwelteinwirkungen hervorzurufen, die Allgemeinheit erheblich zu belästigen, zu gefährden oder zu benachteiligen (§ 10 BImSchG). Dabei kann vorgeschrieben werden, dass die Genehmigung von Anlagen bestimmter Art oder bestimmten Umfangs in einem vereinfachten Verfahren erteilt wird (§ 19 BImSchG). In einem solchen Fall wird das Genehmigungsverfahren nach der Vierten Verordnung zur Durchführung des Bundes-Immissionsschutzgesetzes (4. BImSchV, 2013) durchgeführt, wobei eine Bekanntmachung und eine Öffentlichkeitsbeteiligung (gem. § 10 BImSchG, Abs. 2, 3, 4, 6, 8 u. 9 sowie die §§ 11 u. 14) nicht zur Anwendung kommen. Demnach können Anlagen zur Erzeugung von Strom und Dampf im vereinfachten Verfahren genehmigt werden, „[...] sofern ausschließlich naturbelassenes, gestrichenes, lackiertes oder beschichtetes Holz oder Sperrholz, Faserplatten oder sonst verleimtes Holz sowie daraus anfallende Reste, soweit keine Holzschutzmittel aufgetragen oder enthalten sind und Beschichtungen nicht aus halogenorganischen Verbindungen bestehen, als Holzstaub oder feine Späne, also Hölzer der Klassen AI und AII, zum Einsatz kommen“ (§§ 16/6/19 BImSchG, in Verbindung mit §§ 1 u. 2 der 4. BImSchV sowie Nr. 1.2 in Spalte 2 des Anhangs zur 4. BImSchV). Des Weiteren ist die technische Anleitung zum Schutz gegen Lärm (TA Lärm) zu berücksichtigen.

2.2.7 Kostenstruktur von Holzheizkraftwerken

Die Kosten beim Betrieb eines Holzheizkraftwerks lassen sich vereinfacht in Kapital-, Betriebs- und Brennstoffkosten untergliedern (WISSEL ET AL., 2008). Die Kapitalkosten richten sich dabei unter anderem nach der Höhe der Investitionen, der Finanzierungsstruktur des investierenden Unternehmens beziehungsweise der Finanzmarktsituation. Die Investitionskosten für ein Dampfkraftwerk umfassen die Kosten für die Gebäude und dessen Fundamen-

te, die Kosten für Erdarbeiten, die Anlagenkosten einschließlich Fracht, Montage, Inbetriebnahme und Personalschulung sowie die Projektkosten. Dabei ist zu beachten, dass die Anlagenkosten bei der Stromerzeugung aus biogenen Brennstoffen aufgrund der aufwändigeren Anlagentechnik deutlich höher zu bemessen sind als bei reinen Heizanlagen (NITSCH ET AL., 2004). Im Rahmen einer Angebotsabfrage für einzelne Komponenten eines Holzkraftwerks im Jahr 2005 konnten detaillierte Preise ermittelt werden, nach denen die Kosten für den Dampfkessel inklusive Rostfeuerung und Turbine über 60 Prozent der Investitionskosten beim Bau eines Holzkraftwerks ausmachen. Brennstofflager und -austragung sind lediglich mit etwa 3,5 Prozent an den Kosten beteiligt. Nach NITSCH ET AL. (2004) belaufen sich die Investitionskosten für Dampfturbinenheizkraftwerke auf 3800 bis 4400 Euro je elektrische Anschlussleistung in Kilowatt. Die eigenen Preisermittlungen ergaben in 2006 einen Preis von circa 2600 Euro je Kilowatt elektrisch.

Die Betriebskosten lassen sich subsummieren aus den Personal- und Instandhaltungskosten, den Kosten für Brennstoffe, elektrische Energie und Frischwasser, den Entsorgungskosten für Abwasser und Asche sowie den Verwaltungskosten inklusive der Beiträge für Versicherungen. Den größten Anteil an den Betriebskosten besitzen dabei eindeutig die Brennstoffkosten, für deren Höhe der Bedarf an Hackschnitzeln je erzeugter Energieeinheit und die Preise des Brennstoffs signifikant sind. Der Brennstoffbedarf wird durch den Wirkungsgrad der Energieerzeugung bestimmt. Der Brennstoffpreis ist im Grunde ein Marktpreis, der sich allerdings durch einige Faktoren seitens der Betreiber als beeinflussbar erweist. Neben den örtlichen Besonderheiten am Standort des Kraftwerks, wie dem Bewaldungsanteil oder anderer Holzquellen in der Region oder dem Vorkommen weiterer Holzabnehmer im selben Sortiment, ist die Auslegung des Kraftwerks auf den Brennstoff entscheidend für den Brennstoffpreis. Wenn es in der Lage ist, unterschiedliche Holzqualitäten und -quellen einzusetzen, kann flexibler auf sich ändernde Marktbedingungen beim Holzeinkauf reagiert werden, indem man im Preis gestiegene Sortimente durch andere substituiert. Nach WISSEL ET AL. (2008) machen die Brennstoffkosten einen Anteil von circa 60 Prozent an den Gesamtkosten beim Betrieb eines Holzkraftwerks aus (s. Abbildung 12). Aufgrund des hohen Anteils der Brennstoffkosten an den Ausgaben wird mehrfach der Anstieg der Hackschnitzelpreise als zentraler Grund für wirtschaftliche Probleme beim Betrieb von Holzkraftwerken genannt (SCHUMANN ET AL., 2012). Die Hauptursache dafür findet sich in der Tatsache, dass sich die Einnahmen beim Betrieb eines Holzkraftwerks aufgrund der für die Einspeisung des Stroms für 20 Jahre festgelegten Preise durch das EEG sehr statisch ausnehmen. Steigende Rohstoffpreise können nicht durch höhere Stromverkaufspreise ausgeglichen werden.

Um dynamisch auf steigende Preise reagieren zu können, ist infolgedessen lediglich der Verkauf von Strom außerhalb des EEG oder von thermischer Energie denkbar. Dieser ist allerdings nur ratsam, wenn der Marktpreis für Strom höher ist als der Preis, der auf Basis des EEG für Strom vergütet wird. Da die Erlöse für den Erzeuger lediglich einen Bruchteil (ca. 25 %) der Marktpreise für Strom ausmachen, zeigt sich eine Einspeisung in das Netz außerhalb des EEG als wenig attraktiv. Da durch Netzgebühren, Steuern und Abgaben der Strompreis hoch ist, besteht die Alternative zur Stromeinspeisung nach dem EEG darin, den Strom selbst zu nutzen. Um zudem steigende Rohstoffpreise kompensieren zu können, gewinnt der Verkauf von Wärme an Bedeutung, denn hier können zusätzliche Einnahmen generiert und

Steigerungsraten, die man an gängige Indizes koppeln kann, in den Liefervereinbarungen festgeschrieben werden. Darüber hinaus verpflichtet das EEG ab 2012 dazu, mindestens 60 Prozent der anfallenden Wärme zu nutzen (vgl. Kapitel 2.2.6). Dabei können allerdings Schwierigkeiten bei der Vermarktung der Wärme oder schlimmstenfalls der Wegfall eines wichtigen Wärmeabnehmers ebenfalls zu wirtschaftlichen Problemen führen. Weitere Hintergründe für wirtschaftliche Schieflagen lassen sich im technischen Sektor oder in der mangelnden Einhaltung der Betriebsvorschriften finden.

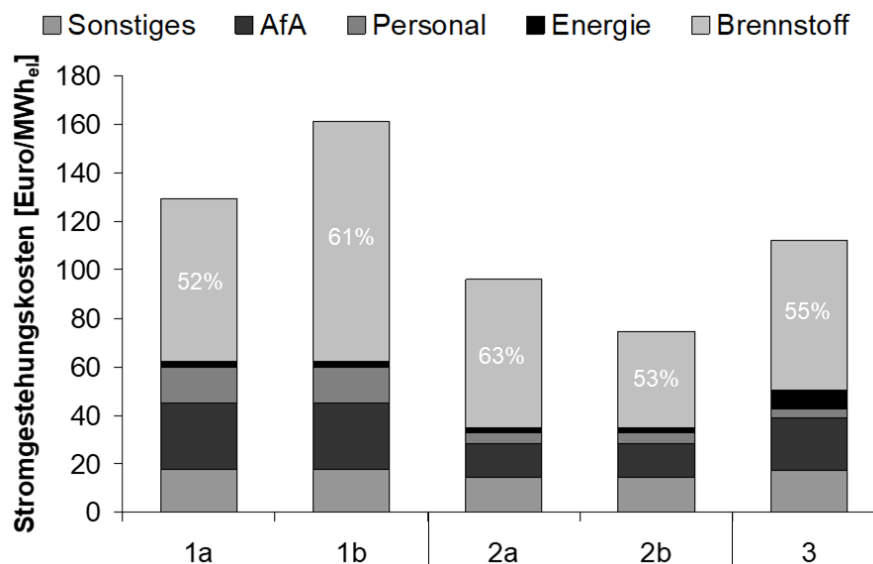


Abbildung 12: Kalkulierte Stromgestehungskosten für drei unterschiedliche Holzheizkraftwerke. Nähere Informationen zu den Varianten (1-3) sind der Tabelle 4 zu entnehmen.

Abbildung 12 zeigt die Stromgestehungskosten und deren Zusammensetzung an drei unterschiedlichen Beispielen. Die Unterschiede entsprechen den differenten Sichtweisen der Autoren und sind in Tabelle 4 aufgelistet. Um eine Vergleichbarkeit hinsichtlich der Brennstoffkosten zu gewährleisten, erfolgt ebenfalls eine Berechnung der Stromgestehungskosten, wobei jeweils die gleichen Holzpreise zugrunde gelegt werden. Gravierende Differenzen bestehen hinsichtlich der Kraftwerksgröße sowie der Höhe der spezifischen Investitionskosten; ebenfalls weichen der elektrische Wirkungsgrad respektive die Verbrennungstechnik sowie die kalkulierte Jahresnutzungsdauer elementar voneinander ab. Die Übersicht der Stromgestehungskosten (vgl. Abbildung 12) deckt somit bereits ein breites Spektrum an Holzheizkraftwerken ab.

Nach Angaben von WISSEL ET AL. (2008) und NITSCH ET AL. (2004) wird deutlich, dass die Kapitalkosten den zweitgrößten Anteil an den Gesamtkosten in einem Holzheizkraftwerk tragen. Jedoch beruhen beide Angaben auf einer Vorabschätzung, weshalb die Höhe des kalkulierten Zinsfußes und die Länge der Abschreibungsdauer einen sehr großen Einfluss auf die Kapitalkosten ausüben. Im Gegensatz dazu beinhalten die Angaben des Statistischen Bundesamtes ausschließlich die tatsächlich angefallenen Kosten. Dieser Unterschied kommt insbesondere auch bei den Kapitalkosten zum Tragen, da hierfür die unternehmensspezifischen Kenngrößen wie Eigenkapitalausstattung, aber auch die Höhe der Abschreibungen von

Bedeutung sind. Aus diesem Grund ist ein Vergleich mit den dargestellten Kosten in der Spanplattenproduktion (vgl. Kapitel 2.2.3), die man auf Basis der Zahlen des Statistischen Bundesamtes ermittelte, nicht möglich. Somit kann der relativ geringe Anteil der Kapitalkosten in der Spanplattenindustrie auf weitestgehend abgeschriebene Produktionsanlagen zurückgeführt werden.

Tabelle 4: Beispielkalkulationen zur Berechnung der Stromgestehungskosten eines Holzheizkraftwerks unterschiedlicher Autoren.

	Beispiel 1 NITSCH (2004)	Beispiel 2 WISSEL ET AL. (2008)	Beispiel 3 BINN ET AL. (2005)
Spez. Investitionskosten [Euro/MW _{el}]	3850	2100	2542
Elektrische Leistung [MW _{el}]	5	20	3,3
Elektrischer Wirkungsgrad [%]	14	30	22,5
Nutzungsdauer [h/a]	7000	7500	8000
Abschreibungsdauer [a]	20	20	15
Brennstoffpreis [Euro/t]	30	69	45

Außer Frage steht allerdings, dass im Gegensatz zur Spanplattenindustrie bei der Energieerzeugung keine nennenswerten Kosten für die Vermarktung der Produkte anfallen. Gleiches gilt auch für Verpackung und Versand der Produkte sowie für chemische Erzeugnisse. Allerdings nimmt sich der hohe Eigenstromverbrauch eines Holzkraftwerks bemerkenswert aus: Der Eigenverbrauch an elektrischer Energie für den Betrieb eines Holzkraftwerkes wird von KAIL ET AL. (1999) mit 15 Prozent der elektrischen Nennleistung angegeben. Da die Antriebe nicht alle gleichzeitig laufen und nicht mit Volllast betrieben werden, kann man mit einer effektiven Leistung von 70 Prozent der elektrischen Antriebe rechnen. Die sich für die Betriebsdauer eines Jahres ergebenden Stromkosten können somit bis zu 10 Prozent der Gesamtkosten ausmachen.

2.2.8 Konkretes Beispiel einer industriellen energetischen Nutzung

Die RWE Innogy betreibt Biomasseheizkraftwerke mit einer Gesamtkapazität von circa 113 Megawatt elektrischer Leistung (RWE, 2008). Dabei soll die Strom- und Wärmeproduktion aus Holz bis zum Jahr 2016 auf 600 Megawatt elektrische und 1600 Megawatt thermische Leistung ausgebaut und damit nahezu verfünffacht werden.

Setzte man in der Vergangenheit vornehmlich auf die Verwendung von Alt- und Recyclingholz zur Energieerzeugung, möchte man zukünftig auf Frischholz¹¹ zurückgreifen. Das Kraftwerk in Erndtebrück (Landkreis Siegen-Wittgenstein) wird als erstes Kraftwerk im Portfolio der RWE komplett über Forstbiomasse versorgt. Man investierte circa 25 Millionen Euro, um einen Biomassedampferzeuger zu betreiben (RWE, 2008), wobei ein Wasserrohrkessel mit

¹¹ RWE verwendet den Begriff „Forstbiomasse“ zur Beschreibung der eingesetzten Rohstoffe auf Frischholzbasis, bestehend aus Waldrestholz und Holz aus der Landschaftspflege.

Vorschubrost zum Einsatz gelangt. Dieser liefert bei einem zulässigen Betriebsdruck von 64 Bar und einer zulässigen Heißdampf­temperatur von 485 Grad Celsius eine maximale Dampfmenge von 30 Tonnen in der Stunde. Im Wesentlichen besteht die Kesselanlage aus dem Kesselkörper mit dem Dampfraum, dem Vorschubrost, den Rauchrohren, den Wendekammern, dem Außenmantel, der Isolierung, der feuerfesten Ausmauerung, dem Überhitzer und einem Economiser zur Aufheizung des Kesselspeisewassers.

Installiert ist eine Treppenrostfeuerung, die eine Feuerungsleistung von etwa 33 Tausend Kilowatt erbringt. Hierfür werden 10 Tonnen Brennstoff in der Stunde mit einem Heizwert von 3,25 Kilowattstunden pro Kilogramm benötigt. Die Brennstofflagerung besteht aus zwei getrennt zu betreibenden, gegeneinander gesetzten, überdachten Lagerplätzen mit einem Fassungsvermögen von etwa 500 Tonnen. Dadurch kann ein Betrieb des Kraftwerks von sechs Tagen ohne Materiallieferungen von außen garantiert werden. Die angekippten Hackschnitzel werden mit einem Radlader beigeschoben und anschließend übergeben die im hinteren Bereich der Lagerhalle installierten Schub­böden das Material an einen außerhalb des Lagers verlegten Sammelförderer. Der Brennstoff wird aus dem Dosierbunker über eine Schnecke in den Feuerraum gefördert, wobei die Dosierung anhand der Anforderungen der Kesselfeuerung (Dampfdruck, Temperatur, Sauerstoffgehalt in der Abluft etc.) gesteuert wird. Da bei der Beförderung der Hackschnitzel Transportschnecken eingesetzt werden, ist die Größe der Hackschnitzel auf maximal 250 Millimeter begrenzt (vgl. Tabelle 5).

Ein zentraler Holzhof, der eine Verarbeitung des angelieferten Holzes vor Ort gewährleistet, ist nicht eingerichtet. Ebenfalls schließt der Platzmangel vor Ort eine Zerkleinerung aus, zumal keine Genehmigung zum Betrieb eines Zerkleinerers vorliegt. Ferner findet man das Betriebsgelände vollständig umzäunt und mit einer Brückenwaage ausgestattet vor.

Tabelle 5: Spezifikation Hackschnitzel für das BMHKW in Erndtebrück.

Materialbeschreibung	
Wassergehalt ca.	30 - 60 (65) %
Schüttdichte	250 - 400 kg / m ³
Körnung	
Normal	150 x 50 x 25 mm
Maximal	250 mm
Minimal	10 mm
Feingutanteil (< 10 mm)	Max. 25 %
Anteil an eisenhaltigen Metallteilen	< 1,0 % TM
Anteil an mineralischen Verunreinigungen	< 3,0 % TM
Anteil an sonstigen Verunreinigungen (Kunststoffe etc.)	< 1,0 % TM

Die verwendete Entnahme-Kondensationsturbine ist ausgelegt auf eine maximale elektrische Leistung von acht Megawatt, wobei bis zu 38 Tausend Megawattstunden Strom jährlich produziert und in das öffentliche Netz eingespeist werden. Gleichzeitig findet eine Dampfkopplung statt, um das in unmittelbarer Nachbarschaft befindliche Pelletwerk mit thermischer Energie zu versorgen. Hierfür sorgen neben der Stromproduktion rund 80 Tausend Tonnen Dampf (100 GWh_{th}) pro Jahr. Das Pelletwerk wurde von RWE Innogy Cogen (90 %) und

German Pellets (10 %) errichtet. Die Investitionskosten belaufen sich auf etwa 21 Millionen Euro. Nach der gemeinsamen Errichtung hat German Pellets den Rohstoffeinkauf, die Betriebsführung und den Absatz der Pellets übernommen. Produziert werden im neuen Werk pro Jahr bis zu 120 Tausend Tonnen Pellets aus Sägerest- und Industrieholz.

Für die Energieproduktion verwendet man insgesamt etwa 40 Tausend Tonnen atro (ca. 70.000 t/a frisch) Waldresthölzer sowie Strauch- und Grünschnitt aus dem Sauer- und Siegerland pro Jahr (MUNLV, 2007). Tabelle 5 gibt Aufschluss über die detaillierte Materialbeschaffenheit.

Das Haupteinzugsgebiet zur Versorgung des Kraftwerks sind die beiden Landkreise Siegen-Wittgenstein und Olpe, welche die Regionalforstämter Siegen-Wittgenstein und Kurkölnisches Sauerland des Landesbetriebes Wald und Holz NRW umfassen. Die Gesamtwaldfläche im Bereich der beiden Forstämter beträgt 122 Tausend Hektar (85 % Privatwald). Mit insgesamt über 30 Tausend Hektar macht der Großprivatwald (>1.000 ha) den größten Anteil am Privatwald in der Region aus (MUNLV, 2010).

Die Fichte besitzt bei der Baumartenverteilung den größten Flächenanteil mit knapp 76 Tausend Hektar, die Buche inklusive sonstiges Laubholz ist auf circa 27 Tausend Hektar vorzufinden (LÖBF, 2000). Das Potential an Fichten-Waldrestholz über alle Altersklassen hinweg beträgt nach einer Schätzung von PÖYRY (2007) etwa 70 Tausend Tonnen atro pro Jahr.

Die Rohstoffkonkurrenten in 100 Kilometern Umkreis des Kraftwerks beschränken sich im Wesentlichen auf einige Spanplattenwerke, wobei Egger in Brilon (ca. 50 km Luftlinie) mit einem Rohstoffbedarf von mehr als 500 Tausend Kubikmeter zu den größten Konkurrenten zählt. Mit Stora Enso in Hagen-Kabel befindet sich des Weiteren eine Papierfabrik im Zielgebiet. Die großen Anlagen der Spanplattenhersteller im Norden (Pfleiderer, Glunz und Kronospan) liegen außerhalb des 100-Kilometer-Radius. Gleiches gilt für die großen Papier- und Zellstoffhersteller Norske Skog und M-real. In den Landkreisen Olpe und Siegen-Wittgenstein sind nur kleine Biomasseheizanlagen mit einem Bedarf an Waldrestholz von insgesamt circa 10 Tausend Tonnen atro pro Jahr ansässig. Die größeren Holzheiz(kraft)werke im 100-Kilometer-Umkreis verwerten Altholz und Industrierestholz.

Noch im Jahr 2008 ging RWE davon aus, dass die Forstbiomasse in Zukunft eine erheblich größere Rolle bei der Energieerzeugung für den Konzern spielen wird (RWE, 2008). Bis 2020 sollten daher in Deutschland bis zu zehn vergleichbare Heizkraftwerke folgen. Es bestehen zwischen RWE und der Forstwirtschaft entsprechende Vereinbarungen zur Abnahme beziehungsweise Lieferung von Waldrestholz. Hierin findet sich auch die Ursache für die Inbetriebnahme weiterer Biomasseheizkraftwerke in Goch und in Kehl im Jahre 2012. In 2013 hat der Konzern allerdings bekanntgegeben, sich aus dem Geschäft zurückzuziehen und seine Beteiligungen an den zwei Kraftwerken veräußert. Weitere Investitionen in Biomassekraftwerke in Deutschland lehnt man ab, um sich zukünftig auf Wind- und Wasserkraft konzentrieren zu können (VARNHOLT, 2013).

2.3 Bereitstellung von Waldrestholz

2.3.1 Logistik und relevante Bereitstellungsketten

Die wichtigsten Marktteilnehmer in der Waldrestholzlogistik sind Waldbesitzer, Dienstleistungsunternehmen und Abnehmer von Waldrestholz. Die Logistik allgemein wird dabei definiert „[...] als die Gesamtheit aller Aktivitäten“ (Planung, Gestaltung und Steuerung) „eines Unternehmens, die die Beschaffung, die Lagerung und den Transport von Materialien und Zwischenprodukten, die Auslieferung von Fertigprodukten [...] betreffen“ (PFOHL, 2004).

Zu den zentralen Prämissen der Logistik zählen „[...] die effiziente Raum- und Zeitüberbrückung der Objekte“ (REMLER, 1999; S. 58).

Bei logistischen Überlegungen ist zwischen Material- und Informationsfluss zu unterscheiden. Gemäß VDI-Richtlinie 3300 versteht man unter Materialfluss „die Verkettung aller Vorgänge beim Gewinnen, Be- und Verarbeiten sowie der Verteilung von Gütern innerhalb festgelegter Bereiche“. Der Informationsfluss dient dazu,

- die richtige Menge
- der richtigen Objekte
- am richtigen Ort
- zum richtigen Zeitpunkt
- in der richtigen Qualität
- bei minimalen Kosten zur Verfügung zu stellen (VDI 3300; JÜNEMANN, 1989; S 18).

Nach JUNG (2006) wird die Logistik und damit die Aktivitäten eines Unternehmens im engeren Sinn horizontal in vier Phasen unterteilt: Die erste Phase beschreibt den Strom der Roh-, Hilfs- und Betriebsstoffe vom Lieferanten zum Beschaffungslager der Unternehmung und hat damit die größte Relevanz für die Waldrestholzbereitstellung. Diese Phase, auch Beschaffungslogistik genannt, beinhaltet darüber hinaus noch die Bereiche Planung, Steuerung, Überwachung der Güterversorgung der Unternehmen und Festlegung von Versorgungsstrategien (vgl. ARNOLD ET AL., 2008), welche in dieser Arbeit ebenfalls behandelt werden.

Für die Beschaffungslogistik sind für die Abnehmer von Waldrestholz folgende Aspekte von maßgebender Bedeutung:

- Bereitstellungsketten
- Qualitätskriterien und Preisfindung
- Form der Lagerbewirtschaftung.

Streng genommen ist eine logistische Betrachtung dabei ausschließlich für ein konkretes Vorhaben sinnvoll. Um jedoch Aussagen über eine zweckmäßige Logistikkette im Bereich Waldrestholz treffen zu können, sind die jeweiligen abnehmertypischen Informationen hinsichtlich der speziellen Rohstoffbedarfssituation sowohl unter Berücksichtigung der jahreszeitlichen als auch tageszeitabhängigen Bedarfsschwankungen sowie die Lagerkapazität und technische Ausstattung beim Abnehmer wichtig.

Die Bereitstellung von Waldrestholz besteht aus einer Abfolge von unterschiedlichen Bearbeitungs-, Transport- und Steuerungsprozessen mit dem Ziel, forstliche Biomasse in einen verwertbaren Rohstoff umzuwandeln und die Ressource vom Wald zum Abnehmer zu trans-

portieren (STAMPFER ET AL., 2006). Die Bereitstellungskette von Waldrestholz besteht im Wesentlichen aus folgenden Einzelprozessen:

- Erfassung und Sortimentierung (z. B. Bündel pressen, Bergen im Wald und Häckseln)
- Lagerung (z. B. Astmaterial am Waldweg, Hackschnitzel am Werk)
- Transport vom Ort des Aufkommens zum Abnehmer
- Sortimentierung / Weiterverarbeitung beim Abnehmer.

Die Einzelprozesse dieses Komplexes können an unterschiedlichen Orten durchgeführt werden, was den grundlegenden Unterschied der Systemvarianten darstellt. Nach JACKÉ (2007C) wird bei der Zerkleinerung von Waldrestholz grundsätzlich nach dem Ort der Zerkleinerung differenziert. Demnach kann der Hackvorgang entweder auf der Rückegasse, an der Waldstraße, an einem zentralen Hackplatz im Wald oder am Ort der Zwischenlagerung beziehungsweise auf dem Gelände der Hackgutverwendung (Endstation) erfolgen (JACKÉ, 2007C). Der Ort der Zerkleinerung wird in Abhängigkeit von den verfügbaren Betriebsmitteln (bspw. Zerkleinerer bzw. dessen Trägerfahrzeug) und den weiteren Arbeitsbedingungen vor Ort (z. B. Breite der Straße, Entfernung zum Abnehmer) und beim Abnehmer (Platzverhältnisse, stationärer Hacker) gewählt.

Waldrestholz kann in Form von losem Schlagabraum, komprimierten Bündeln und Hackgut befördert werden. Die erreichbare Ladedichte und die Transportdistanz sind bestimmende Erfolgsfaktoren beim Transport (KÜHMAIER ET AL., 2007). Waldrestholz kann ebenfalls in den genannten Formen gelagert werden. Welche Variante und welchen Ort man für die Lagerung bevorzugt, hängt vor allem von den standörtlichen Gegebenheiten, den entstehenden Kosten sowie den Anforderungen des Abnehmers ab. Bei allen Varianten können im Laufe der Lagerung Trockensubstanzverluste durch Abbauprozesse und gesundheitliche Gefährdungen durch Schimmelpilze, allerdings in unterschiedlichen Intensitäten, entstehen. Die Lagerung kann im Freiland oder überdacht erfolgen. Dabei kann das Material jeweils zu größeren Einheiten (in Poltern, Lagerplätzen am Waldweg, Hackschnitzelhaufen) oder in kleineren Mengen bis hin zur flächigen Lagerung (Schlagabraum nach der Rundholzernte auf der Fläche) zusammengestellt sein.

Es ist weder sinnvoll noch möglich, die Gänze der potentiell durchführbaren Bereitstellungssysteme im Bereich der Waldrestholznutzung im Rahmen dieser Arbeit abzudecken. Für die weitere detaillierte Betrachtung sollen daher ausschließlich „*professionelle Anwendungen*“ Erwähnung finden, die sich der Bestimmung von Jacké anschließend, wie folgt, charakterisieren:

1. „[...] weitestgehende Mechanisierung der Bereitstellung des zu zerkleinernden Rohholzes,
2. Zerkleinerung mit hochleistungsfähigem Hacker (Schredder, ggf. Zerspaner, s. JACKÉ, 2007B) ab ungefähr 200 kW Antriebsleistung“ (JACKÉ, 2007C; S. 39).

Somit sind zwei grundsätzlich differente Ansätze zu betrachten: Zum einen die Zerkleinerung im Wald mit mobilen Zerkleinerungsmaschinen und zum anderen die stationäre Zerkleinerung. Beide Ansätze beruhen auf einer vollständigen Mechanisierung der einzelnen Arbeitsverfahren und -ablaufschritte.

2.3.2 Zerkleinerung im Wald / Hackschnitzellinien

Nach KÜHMAIER ET AL. (2007) stellen das Hacken an der Waldstraße und der anschließende Transport der Hackschnitzel die am häufigsten verwendeten Arbeitssysteme dar. Gleiches konstatieren RANTA ET AL. (2006), die angeben, dass in Finnland etwa 70 Prozent der bereitgestellten Waldrestholzmengen auf diese Weise gewonnen werden. Das nachfolgende Verfahrensfunktioigramm (Abbildung 13) stellt das beschriebene Verfahren auf einem Blick dar.

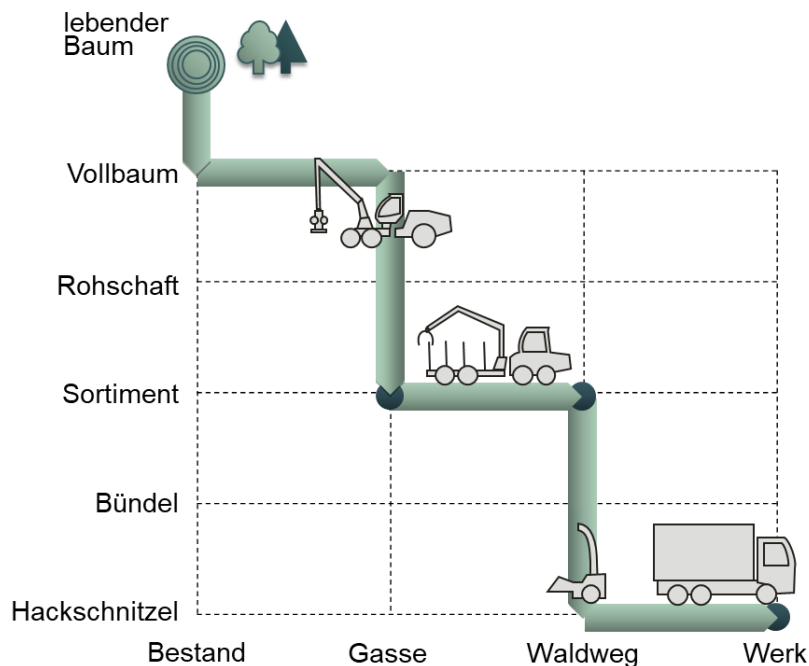


Abbildung 13: Verfahrensfunktioigramm: Zerkleinerung im Wald (Grafik in Anlehnung an ERLER ET AL., 2009).

Im Anschluss an die konventionelle Holzernte im Bestand (motormanuell oder mittels Harvester) wird der verbleibende Schlagabraum an den Waldweg gerückt. Unter ökonomischen und technischen Gesichtspunkten kommen aufgrund der Arbeitsweise für die Rückung lediglich Schlepper mit Rückewagen oder Tragschlepper infrage. Bei anderen, in der Stammholzrückung üblichen Maschinentypen wie Seil- und Zangenschleppern ist eine hohe Lastbildung beziehungsweise -konzentration nicht möglich, woraus nur eine geringe Produktivität resultiert (CREMER, 2008; WITTKOPF, 2005). Als Konsequenz gehen beide Autoren davon aus, dass diese Verfahrensvarianten in der Praxis nur eine geringe Rolle spielen werden und deshalb von leistungsfähigeren Arbeitsverfahren mit tragender Arbeitsweise verdrängt werden.

Setzt man Tragschlepper ein, handelt es sich in der Regel um marktübliche oder modifizierte Modelle. Um eine Steigerung der Produktivität zu erreichen, wird sich technischer Modifizierungen insbesondere im Ladebereich bedient; So beispielsweise, indem anstelle der Rungen sogenannte ‚Kompaktoren‘, also mittels Hydraulik bewegliche Seitenwände, eingesetzt werden, die das lose Material verdichten (vgl. Abbildung 14, rechts). Die Kompaktoren dienen dabei lediglich dem Transport und nicht der Lagerung, da man beim Entladen der Forwarder die Seitenwände öffnet und das Material dann als lockere Schüttung beziehungsweise mittels

Kran und Greifer verdichtet auf Raubergen am Waldweg aufgesetzt wird. Der Einsatz von Kompaktoren erfordert eine gewisse Mindestleistung des Hydrauliksystems der Forwarder.

Zur Steigerung der Ladekapazität berichten KALLIO ET AL. (2005) von der Anbringung von hydraulisch verstellbaren Rungen, wodurch das Ladevolumen ebenfalls erweitert werden kann. Weitere Anbaumöglichkeiten an der Ladefläche des Forwarders sind abnehmbare oder fest montierte Außenwände aus Stahl oder Holz (meist Einzelanfertigungen) sowie zusätzlich zu den vorhandenen Rungen eingeschweißte Verstrebungen, um dem Verlust von Reisig und dünnen Ästen während des Transports entgegenzuwirken (vgl. Abbildung 14, Mitte).

Die Rückung von Waldrestholz findet bisher selten Erwähnung in der Literatur. Zwar existieren zahlreiche Veröffentlichungen, die das Rücken von Energieholz analysieren, jedoch beziehen sich diese meistens auf die Rückung ganzer Bäume oder Baumteile bei der Nutzung von Schwachholz (vgl. CREMER, 2008). Für die Beurteilung der Rückeleistung wird daher Literatur herangezogen, die den Einsatz von Tragschleppern beim Transport von Schlagabraum von der Fläche an den Waldweg nach Durchforstung oder Kahlschlag beschreibt. Unberücksichtigt bleiben Ergebnisse aus dem Vortransport, bei denen keine Befahrung der Fläche stattgefunden hat, und der Transport von Ganzbäumen oder Baumteilen bei der Ernte von Schwachholz.

Für das Aufsammeln von Schlagabraum eignen sich speziell Reisig- und Grüngutgreifer (RANTA, 2002), denn im Gegensatz zu den Kurzholzgreifern sind die Zinken hier nicht verbunden (s. Abbildung 14, links), so dass weniger Steine und Erde beim Einsammeln des Schlagabraums mit aufgenommen werden. Ein Reisiggreifer steigert die Leistung deutlich (LAITILA ET AL., 2005).



Abbildung 14: Seitenansicht eines Astgreifers / auch (Vier)Fingergreifer genannt (links), modifizierte Rungen eines Forwarders (Mitte) und ein sogenannter Presscollector (rechts; WELLINK, 2013).

LÜTHY (1997) hat eine umfangreiche Studie zur Produktivität von Forwardern bei der Kurzholzurückung erarbeitet, die in zahlreiche wissenschaftliche Arbeiten (z. B. EBERHARDINGER ET AL., 2009; CREMER, 2008; PAUSCH, 2002) einfließt. Darin stellt er die Abhängigkeit des Stückvolumens sowie der Rückeentfernung und der Anzahl der Sortimente von der Rückeleistung heraus. Nach ZIESAK ET AL. (2004) muss neben dem Stückvolumen auch die Anzahl und die Länge der Sortimente berücksichtigt werden.

Im Gegensatz zum Rundholz hat Schlagabraum eine deutlich geringere Lagerungsdichte (HAKKILA, 2004; RANTA, 2002; PATZAK 1984B), was dazu führt, dass in der Regel das Volumen und nicht die Masse der Ladung, die maximale Auslastung beschränkt (KÄRHÄ ET AL., 2006). Dieses Problem verstärkt sich, je unförmiger das zu transportierende Material sich ausnimmt sowie mit abnehmendem Volumen des Einzelstücks. Bei der ausschließlichen Rückung von Astmaterial nimmt die Ausladung aufgrund der geringeren Ladedichte entsprechend ab, weshalb lediglich eine Ladekapazität von vier bis fünf Erntefestmetern je Fuhre erzielt werden kann (RANTA, 2002). Durch eine Vergrößerung des Laderaums oder durch eine Verdichtung des Ladeguts kann die Auslastung gesteigert werden (KALLIO ET AL., 2005; AHONEN ET AL., 2000), was jedoch die Gefahr vergrößert, Teile der Ladung während der Fahrt zu verlieren.

CREMER (2008) kann als weitere Einflussvariablen bei seinen Untersuchungen (27 Fälle) den BHD des ausscheidenden Bestandes und den Zopfdurchmesser signifikant nachweisen. Er beobachtet, dass die Produktivität des Forwarders beim Rücken von Waldrestholz ansteigt, wenn der BHD oder auch der Zopfdurchmesser größer werden. Einen charakteristischen Zusammenhang zwischen der Rückeentfernung und der Produktivität musste auch Cremer aufgrund fehlender Daten schuldig bleiben. Die Produktivitätswerte seiner Beobachtungen schwanken zwischen 10 und 35 Schütterraummetern je MAS, die mittlere Rückeentfernung liegt zwischen 50 und 190, im Mittel bei 130 Metern.

Den Einfluss der Rückeentfernung auf die Produktivität zeigen sowohl LÜTHY (1997) für Rundholz als auch KALLIO ET AL. (2005) für Energieholz. Die AfL Niedersachsen (2012) hingegen unterscheidet in ihrer alle zwei Jahre erscheinenden Informationsbroschüre bei der Kalkulation von Rückekosten in einer hochmechanisierten Holzerntekette hinsichtlich der die Produktivität beeinflussenden Kriterien lediglich zwischen „*einfache[n] Verhältnisse[n]*“ im Flachland und „*schwierige[n] Verhältnisse[n]*“ im Bergland. Sowohl das Stückvolumen des zu rückenden Holzes als auch die Rückeentfernung finden keine Berücksichtigung bei der Kostenkalkulation. Einziges Zugeständnis ist ein Aufpreis für mehr als vier Sortimente in einem Schlag, was für die Rückung von Schlagabraum selbst keine Relevanz besitzt.

Bei dieser Bereitstellungskette kann der Schlagabraum im Bestand (vor dem Rücken) oder am Waldweg bis zu einem gewissen Grad zwischengelagert werden. Diese Lagerungsdauer findet sich davon bestimmt, ob der Schlagabraum durch die Begleitvegetation überwuchert und das spätere Einsammeln dadurch erschwert wird. Zudem können aufkommende Naturverjüngung oder die Pflanzung, aber auch Forstschutzaspekte eine Einschränkung darstellen.

Die Lagerung am Waldweg erfolgt in der Regel auf Polter ähnlichen Raubergen. Dabei wird versucht, die Wipfelstücke und das Astmaterial stirnbündig aufzusetzen, um die spätere Entnahme (bspw. beim Hacken) zu erleichtern. Bei der Lagerung im Polter ist ein großer Platzbedarf, insbesondere in der Tiefe (vom Waldweg aus in den Bestand) zu berücksichtigen. Wie auch bei anderen Lagerungsvarianten besteht in diesem Fall die Gefahr eines Befalls und einer Massenvermehrung von rindenbrütenden Insekten. Zudem bleibt bei der Ablage am Waldweg zu beachten, dass durch die konzentrierte Lagerung intensive Lockstoffe an die Insekten ausgesendet werden. Um zu verhindern, dass Schnee und Regen die Lagerung zu sehr beeinträchtigen, können die Polter mit einem Fließ oder einem speziellen Papier von oben abgedeckt werden (GENSING, 2008). Bei beiden Lagerungsvarianten setzt

jedoch mit der Zeit ein Zersetzungsprozess (s. Kapitel 2.4) ein, der die Qualität des Materials beeinträchtigt.

Für die anschließende Zerkleinerung kommen unterschiedliche technische Ansätze in Betracht. Bei der Weiterverarbeitung am Waldweg finden mobile Zerkleinerer Verwendung, wobei zumeist den Hackern, die das zerkleinerte Material direkt in bereitstehende Container beziehungsweise Fahrzeuge befüllen, der Vorzug gegeben wird (STRUNK, 2014; EBERHARDINGER, 2007). Hacker arbeiten mit (scharfen) Messern, die das Material regelrecht zerschneiden. Hierfür sind die Messer an hochtourig rotierenden Werkzeugen befestigt. Die Maschinen erzeugen unter guten Bedingungen (scharfe Messer, frisches, aber nicht zu elastisches Material, am besten Stammholz) Hackschnitzel mit einer gleichmäßigen Größenverteilung und einer glatten Oberfläche (NEFF, 2007). Bei bereits angerottetem oder sehr trockenem Material neigen die Hacker gelegentlich zur Erzeugung von Hackgut mit einem hohen Feinanteil (NEMESTÓTHY, 2012B). Bei dünnem Material (Äste) entstehen lange Spreißel (Ausreißer). Durch die hohe Rotationsgeschwindigkeit der Messer zeigt sich der Hacker empfindlich gegenüber Fremdstoffen im zu zerkleinernden Material (Steine, Metall etc.).

Die Marktübersicht des KWF (HEINRICH, 2011) sowie die Online-Datenbank des Bundesforschungs- und Ausbildungszentrums für Wald, Naturgefahren und Landschaft (NEMESTÓTHY, 2008) geben Auskunft über das derzeit verfügbare Maschinenangebot. MERGLER ET AL. (2012), JACKE (2007B), DENKINGER (2005), KALTSCHMITT ET AL. (2001) sowie DE LABORDE (1988) beschreiben die Technologie mobiler Hacker und zeigen die Vor- und Nachteile verschiedener Prinzipien auf.

Im industriellen Maßstab werden bei der Zerkleinerung von Waldrestholz aus der Gruppe der Hacker vor allem Trommelhacker verwendet (KUPTZ ET AL., 2015). Hierbei sind die Hackmesser an einem Zylinder, der um die Längsachse rotiert, angebracht. Der Stellungswinkel beziehungsweise die Anordnung der Messer sowie die Rotationsgeschwindigkeit bestimmen die Dimension der Hackschnitzel (JACKE, 2007B). Für viele Trommelhacker existieren darüber hinaus wechselbare Siebkörbe, wodurch die Korngrößenverteilung ebenfalls beeinflusst werden kann (SPINELLI ET AL., 2014).

Aufgebaut werden mobile Hacker auf Anhängern, Lastkraftwagen und Tragschleppern. Als Antrieb dienen den Hackern eigene Diesellaggregate, die Motoren der Trägerfahrzeuge und Zugmaschinen oder eine Kombination aus beiden. Der Antrieb der Hackertrommel erfolgt zumeist über eine direkte Verbindung der Kupplung mit dem Motor beziehungsweise über Zapfwelle-Kupplung-Getriebe; während Gebläse, Einzugswalzen und Kran hydraulisch betrieben werden. Bei der Kombination aus Eigenmotor des Hackers und Motor des Zug- oder Trägerfahrzeugs werden zum Beispiel die Hackertrommel vom Eigenmotor und das Gebläse vom Trägerfahrzeug mit der notwendigen Energie versorgt (JENZ, 2008).

Die Materialzuführung erfolgt über Stahlwalzen und/oder Stahlbänder; der Materialaustrag geschieht in den meisten Fällen mittels eines Auswurfgebläses. Durch die hohe Beschleunigung der Hackschnitzel im Gebläse-Auswurf-System werden diese zum Teil zerdrückt, was zu einem nicht erwünschten höheren Feinanteil führt. Bedingt durch die sehr hohe Rotationsgeschwindigkeit innerhalb des Gebläses entstehen erhebliche Schallemissionen. Um diesem

Problem vorzubeugen, bieten einige Hersteller alternativ auch ein Förderband zum Materialaustrag an, durch das die Hackschnitzel schonender und leiser ausgetragen werden. Des Weiteren ist ein größerer Kraftaufwand für den Antrieb des Gebläses erforderlich: Während das Gebläse bei einem professionellen Hacker rund 60 Kilowatt Antriebsleistung bei voller Auslastung benötigt, beläuft sich nach Herstellerangaben die Antriebsleistung eines Förderbands auf maximal 10 Kilowatt. Umgerechnet bedeutet das eine Kraftstoffersparnis von bis zu 12 Liter Diesel pro Betriebsstunde (JENZ, 2012). Diesen Effekt konnten jedoch weder Spinelli et al. (2012) noch HÜTTL ET AL. (2015) bei Feldmessungen nachweisen, wobei die Ergebnisse Letzterer, nach eigener Auskunft, auf wenige Einzelwerte beruhen und nicht signifikant sind.

Die gängigsten Varianten zum Abtransport der Hackschnitzel im professionellen Bereich sind Lastkraftwagen (Lkw) als Abrollkipper mit großvolumigen Containern, gegebenenfalls als Gliederzug mit Anhänger, Sattelzugmaschinen mit Schubboden-Aufliegern (sog. *Walking Floor*) oder landwirtschaftliche Schlepper mit Anhänger und Spezialaufbau für voluminöse Schüttgüter.

Beim Transport durch Abrollkipperfahrzeuge kann der Abrollbehälter (Container) mit einem Hakengerät aller marktüblichen Typen aufgenommen und abgestellt werden (MAIER-WITT ET AL., 2001), wobei Hakengeräte in unterschiedlichen technischen Ausführungen - als Knick-, Schub- und Schub-Knickhakengerät (s. Abbildung 15) - existieren. Knickhakengeräte zeichnen sich zwar durch eine geringe Eigenmasse und einen verschleißarmen Betrieb aus, es können jedoch lediglich Container einer vorgegebenen Länge manipuliert werden. Bei Schubhakengeräten verhält es sich anders: Hier ist es denkbar, unterschiedliche Containerlängen, mit bis zu drei Metern Unterschied zwischen längstem und kürzestem Container, aufzunehmen (HIAB, 2013). Das Schub-Knickhakengerät lädt ebenfalls Container unterschiedlicher Längen auf und verfügt dabei noch über eine flache Aufnahmekurve, durch die auch das Arbeiten in Hallen mit niedriger Deckenhöhe gestattet wird. In diesen Fällen richtet sich der Containerboden weniger senkrecht auf als bei den übrigen Ausführungen, so dass ein Verrutschen, Umkippen oder bei Schüttgütern ein Verlust einer Teilladung verhindert werden kann. Jedoch verfügt das Schub-Knickhakengerät auch über die höchste Eigenmasse. Für Hakengeräte sind je nach genannter Ausführung in etwa eine Eigenmasse von drei bis fünf Tonnen und Kosten von circa 25 Tausend Euro einzurechnen (KÜHMAIER ET AL., 2007).



Abbildung 15: Abrollkipper mit unterschiedlichen Hakenliftgeräten. Von links nach rechts: Schub-, Knick- und Schub-Knickhakenliftgerät (HIAB, 2013).

Abrollcontainer (s. Abbildung 16) gibt es in zahlreichen Größen und Variationen, wobei der Unterrahmen der Container genormt ist (DIN-Norm 30722). Für den Hackguttransport bieten

sich großvolumige, offene Container an. Die Zuladung wird durch die zulässige Gesamtmasse des Gespanns und durch die bauartbedingte maximale Zuladung der Container bestimmt. Zum Einsatz kommen in der Regel gewöhnliche Straßenfahrzeuge mit einer Drei-Achs Zugmaschine, ohne Allradantrieb und einem Anhänger mit zwei Achsen. Sollte das Manövrieren mit einem Gliederzug auf den Waldwegen aufgrund enger Platzverhältnisse oder langer Rückwärtsfahrten nicht möglich sein, können die Container zwischen Zugfahrzeug und Anhänger gewechselt werden, wobei es in diesem Fall zwingend ist, den Anhänger von der Zugmaschine abzukoppeln. Die Zugmaschine fährt hierzu rückwärts an das hintere Ende des Anhängers und schiebt den Container herüber. Bei diesem Vorgang helfen die höhenverstellbare Hinterachse der Zugmaschine sowie der Seitenschwenk des Hakengeräts. Zum Wechseln der Container muss ausreichend Platz vorhanden sein, da ein Container auf dem Boden abgestellt werden muss, sofern man zwei Container mitführt. Um den Container des Anhängers abzukippen, ist ebenfalls ein Wechsel des Behälters auf das Zugfahrzeug notwendig, da nur hier die entsprechende hydraulische Kippvorrichtung in Zusammenhang mit der Hakenaufnahme installiert ist.

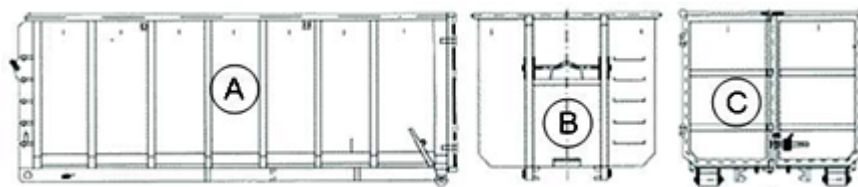


Abbildung 16: Schematische Zeichnung eines typischen Abrollcontainers. Seitenansicht (A), Vorderseite mit Öse (B) und Hinterseite mit Klappen und Rollen (C). Eigene Darstellung aus www.rainbow-containers.de.

Sattelaufleger mit Schubboden können sowohl lose Schüttgüter als auch Stückgut transportieren und verfügen zudem über ein hohes Nutzvolumen von bis zu 100 Kubikmetern. Auch die Nutzlast der Gespanne nimmt sich aufgrund der Leichtbauweise der Auflieger (ab ca. 7 Tonnen Eigenmasse) beträchtlich aus (FLIEGL, 2012). Beim Transport von Holzhackschnitzeln sind die Auflieger so ausgeführt, dass sich die Dachplane öffnen lässt (bspw. in Form einer Dachrollplane) und die Beladung durch die Hacker über das Dach erfolgt. Die horizontale Entladung findet allerdings über die im Boden befindlichen Profile statt, die jeweils in Sektionen unterteilt und in Längsrichtung durch Hydraulikzylinder bewegt werden. Zum Entladen fahren zunächst alle Sektionen gleichzeitig für einige Dezimeter Richtung Heck und befördern das Material nach draußen. Im nächsten Schritt rücken die Sektionen einzeln zurück in ihre Ausgangsstellung. Dieser Vorgang wird so lange wiederholt, bis der Auflieger vollständig entladen ist. Damit dieses rückstandsfrei erfolgt, wird eine mitlaufende Schiebewand, deren Kanten mit austauschbaren Dichtungsgummis versehen sind, eingesetzt. Die Auflieger sowie die Zugmaschinen sind in der Regel als normale Straßenfahrzeuge ausgestattet, was die Geländegängigkeit und Manövrierfähigkeit insbesondere bei Waldfahrten einschränkt.

Landwirtschaftliche Schlepper haben als Zugmaschine gegenüber Lastkraftwagen einerseits den Vorteil, dass sie für schwieriges Gelände ausgelegt sind, entsprechend also Waldfahrten mit deren unwegsamen Straßen und engen Kurven weniger Probleme bereiten. Andererseits

ist die Höchstgeschwindigkeit der meisten, auch modernen Schlepper auf 50 Kilometer pro Stunde beschränkt (mit Ausnahme sog. Schnellläufer – bis 80 km/h). Sofern die zulässige maximale Zuglänge nicht überschritten wird, dürfen Schlepper (Zugmaschinen) im Gegensatz zum Lastkraftwagen zwei Anhänger ziehen (StVZO, 2012); beim Hackschnitzeltransport sind die Schlepper allerdings in der Regel mit nur einem Anhänger versehen. Zu diesem Zweck werden Kipper, Überlade- und Abschiebewagen oder spezielle Abrollwagen verwendet und sogar die Benutzung von Hakenliftanhängern zur Verwendung oben genannter Container ist denkbar.



Abbildung 17: Schlepper mit Tridem Rollbandwagen.

Bei den Abschiebewagen etablierten sich in den letzten Jahren auch Rollbandwagen (vgl. Abbildung 17). Bei einer Dreiachsenausführung können in diesem Fall bis zu 55 Kubikmeter Schüttgut (max. 25 Tonnen) transportiert werden. Ähnlich dem Schubboden wird das Material hier horizontal entladen: Ein in beide Richtungen beweglicher Boden (Gummi) befördert die Ladung im Endlosverfahren; ein Schiebeschild wird nicht verwendet. Das Rollband wird mit Hydraulikmotoren angetrieben, wodurch ein deutlich niedrigerer Volumenstrom / Ölbedarf, als bei Abschiebewagen, bei denen sich ausschließlich das Schiebeschild auf ganzer Länge bewegt, erforderlich ist. Durch die horizontale Endladung kann auch auf unebenem Untergrund und in Hallen mit niedriger lichter Höhe gearbeitet werden. Eine stufenlos regelbare Bandgeschwindigkeit gestattet es, das Gut exakt dosiert abzuladen. Das Abrollsystem weist offensichtlich eine geringere Eigenmasse (ca. 1,5 Tonnen) als alle anderen Systeme auf (KRAMPE, 2013).

2.3.3 Zerkleinerung am Werk / Bündellinien

Die größte Herausforderung bei der Zerkleinerung am Werk liegt im Transport des Schlagabraums. Aus diesem Grund kam es Anfang der 1980er Jahre in Skandinavien zur Entwicklung der Bündeltechnologie.

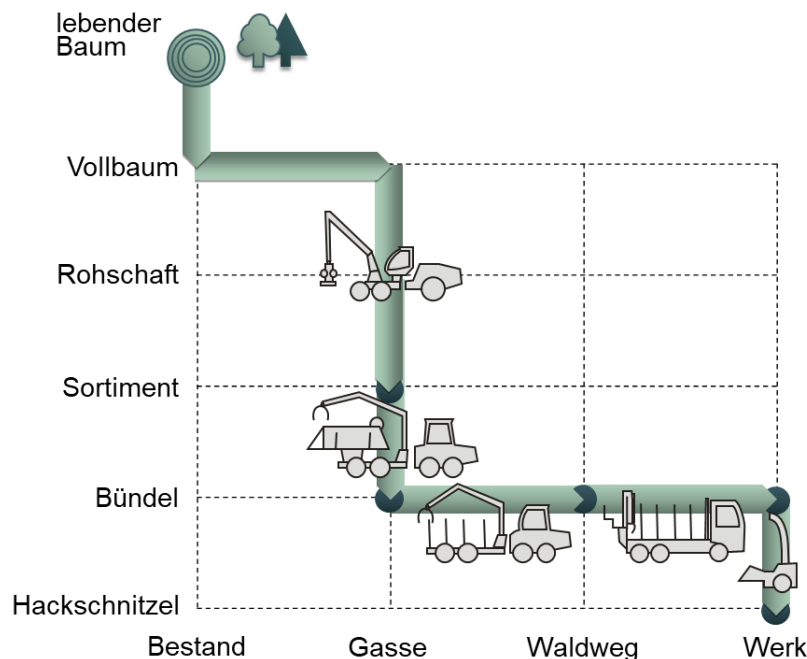


Abbildung 18: Verfahrensfunktiogramm: Zerkleinerung am Werk (Grafik in Anlehnung an ERLER ET AL., 2009).

Nach einem motormanuellen oder maschinellen Einschlag des Stammholzes wird der Schlagabraum durch den Kran des Restholzbündlers direkt auf der Fläche aufgenommen und im jeweiligen Aggregat zu kompakten Bündeln komprimiert (vgl. Abbildung 18). Hauptziel ist hierbei eine Verdichtung des Materials und die damit verbundene verbesserte Transportfähigkeit über längere Strecken. Eine der ersten Maschinen war der Prototyp ‚Slyman‘. Im Mai 1985 führte das ‚Department of Forest Products‘ der schwedischen Universität für Agrarwissenschaften erste Bündel- und Lagerungsversuche durch. Es folgten die ebenfalls in Schweden entwickelten Prototypen ‚Fiberpac‘, der Vorgänger des aktuellen Bündlers der Firma John Deere Forest, sowie ‚WoodPac‘ von Partek Forest AB, der schließlich von Komatsu Forest gebaut und vertrieben wurde. 2003 stellte man auf der Basis des WoodPacs einen Prototyp vor, der für die deutschen Verhältnisse und den Einsatz von Laubholz modifiziert worden war (KOMATSU, 2005). In Skandinavien wird die Bündeltechnik vor allem in Nadelholzbeständen nach der Endnutzung angewendet und dient der Verarbeitung von Schlagabraum, der effizienten Gewinnung von Bioenergie und der Flächenräumung vor der Aufforstung (HAKKILA, 2004). Auf diese Weise erzeugte man beispielsweise in Finnland im Jahr 2005 circa zwei Millionen Bündel. Europaweit waren 2004 etwa 30 Timberjack 1490 D / Fiberpac Bündler (davon 23 Maschinen in Finnland) im Einsatz (TIMPERI, 2004).

In Deutschland fanden in den Jahren 2004 bis 2009 zahlreiche Einsätze von Restholzbündlern beziehungsweise Maschinenverkäufe statt: So hatte der Hersteller Pinox OY aus Finn-

land von 2005 bis 2008 sieben Kombimaschinen (Pinox 828) mit Bündelaggregat (Pinox 330) hierzulande verkauft (NOLTE, 2009). Einen signifikanten Boom erreichte die Branche durch den Windwurf Kyrill im Jahr 2007 und der anschließenden Beseitigung des Schlagabraums zur Pflanzvorbereitung und aus Gründen des Forstschutzes.

Nach REUTHER (2005) existieren zwei unterschiedliche Systeme zur Bündelung von Waldrest- und Schwachholz: Hierbei handelt es sich um die sogenannten Einfaden- und Mehrfadenbündler, die mit einer unterschiedlichen Methode zum Binden der Bündel operieren. Beim Mehrfadenbündler wird gleichzeitig an mehreren Stellen das fertige Bündel umwickelt, weshalb die Produktion in der Regel diskontinuierlich erfolgt. Das heißt, nach Befüllung mit ausreichend Material wird ein komplettes Bündel zusammengefügt, gewickelt und ausgegeben.

Im Bereich der Mehrfadenbündler sind zwei Hersteller nennenswert: Es handelt sich zunächst um Komatsu Forest (ehemals Valmet), einen langjährigen Hersteller von Forstmaschinen, der das Produkt WoodPac in seiner aktuellen Produktübersicht allerdings nicht mehr führt (KOMATSU, 2012). Bei diesem wird der Schlagabraum von oben in die Maschine eingefüllt, durch eine Säge am Greifer werden die Wipfelstücke bereits auf die maximale Länge von 350 Zentimeter eingekürzt. Im Bündler wird das Material dann mit Hilfe von acht Walzen verdichtet, nach Erreichen der Zielstärke an mehreren Stellen gleichzeitig mit Schnurmaterial umwickelt und seitlich ausgegeben. Durch dieses Vorgehen ist der Platzbedarf gering, so dass das System als einziges auf einer engen Rückegasse im Bestand ausgeführt werden kann. Darüber hinaus ist es als Wechselaufbau für unterschiedliche Trägerfahrzeuge konzipiert.



Abbildung 19: Mehrfadenbündler WoodPac der Firma Komatsu Forest (links; LUCERO, 2009) und Fixteri der Firma Biotukki (rechts; FIXTERI, 2013).

Ein weiteres System, welches seit etwa 2005 existiert, ist zum anderen der ‚Fixteri‘ der Firma Biotukki OY. Dieser ist vorrangig auf die Bündelung von Schwachholz, gegebenenfalls auch auf Wipfelholz, aber nicht für sonstigen Schlagabraum ausgelegt. Die Ganzbäume werden einzeln oder bei Fällung mit einem akkumulierenden Fällaggregat in einer Gruppe, mit dem Stammende voran, dem Bündler in Längsrichtung von vorne zugeführt. Zwei Einzugsrollen ziehen das Holz ein, wobei ein Teil der schwachen Äste und Blätter / Nadeln abfallen (JYLHÄ ET AL., 2007). Bei einer Länge von circa 280 Zentimetern wird das eingezogene Holz gekappt und horizontal verschoben. Anschließend zieht das Gerät die nächsten Abschnitte ein. Der Ablauf wird solange wiederholt, bis die gewünschte Bündelstärke von etwa 80 Zentimetern im

Durchmesser erreicht ist. Das fertige Paket wird angehoben und an mehreren (2 - 4) Stellen gebunden, wahlweise mit Schnur oder Netz. Die Maschine wirft das fertige Bündel seitlich aus. Durch die kompakte Bauweise und das seitliche Abwerfen der Bündel ist eine platzsparende Arbeitsweise grundsätzlich möglich, allerdings verhindern die sich im Einzugs befindlichen Ganzbäume das Fahren im Bestand, während das Material eingespeist wird. Die Flexibilität des Fixteri erweist sich somit als eingeschränkt.

Zu den Einfadenbündlern gehören die in Abbildung 20 ersichtlichen Maschinen. Die Bündelaggregate sind mittlerweile bei allen Herstellern abnehmbar und können auf unterschiedlichen Trägerfahrzeugen (Lkw, Anhänger, Kombimaschine und Tragschleppern) installiert werden. Beim Aufbau ist jeweils zu beachten, dass man die notwendige Steuerung des Bündelaggregats implementiert und zudem ausreichend Pumpenleistung für die Hydraulik zur Verfügung steht.



Abbildung 20: Einfadenbündler von John Deere (1; NUHN, 2013), Dingoma (2; DINGOMA 2013); Monra Forestal (3; MONRA, 2013) und Pinox (4).

Die Funktionsweise aller Bündler dieser Gruppe ist ähnlich. Schlagabraum, Baumwipfel, Vollbäume werden in ihrer vollen Länge auf den Aufnahmetisch der Aggregate gegeben, wo dann unterschiedliche Einzugsvorrichtungen das Material einziehen. Bei Pinox handelt es sich dabei um Stahlförderbänder und -rollen, alle anderen Systeme verwenden Stahlwalzen mit Stacheln zum Einzug. Die Objekte werden kontinuierlich verarbeitet und in mehreren Stufen zusammenpresst. Die erste Komprimierung erfolgt über die Einzugsvorrichtungen, danach verdichtet eine weitere Presse beim Binden. Bei Pinox geschieht die erste Kompression des Materials, indem das obere Stahlband, das gleichzeitig als Press- und Einzugs-einheit fungiert, die eingeführten Objekte ohne separate Druckvorrichtungen nach unten verdichtet. Auf diese Weise werden die Zylinder und die Maschinenkomponenten geschont und ein kontinuierlicher und effizienter Bündelprozess gewährleistet. An den Prozess des Verdichtens

und Materialtransports schließt sich der Arbeitsschritt des Bindens an. Die verwendeten Schnüre sind auf Rollen aufgespult und befinden sich in der drehenden Wickeleinheit, die fest mit der Presseinheit verbunden ist. Die Wickelung selbst erfolgt, indem die Wickeleinheit in variablen Abständen um das Bündel rotiert. Bei nachlassendem Kompressionsdruck der Presseinheit dehnt sich das Material etwas aus, wodurch sich das Wickelgarn festzieht.

Am Ausgang der Presseinheit ist ein Längenmessrad zur Bestimmung der Bündellänge lokalisiert. Ein Vermessungs- und Kontrollsystem überwacht die Festigkeit der Bündel, bindet und trennt sie am Ende des Bündelaggregates mit unterschiedlichen Kappsyste men automatisch auf die gewünschte Länge ab. Als Sägemechanismus zum Ablängen der Bündel dient dabei eine Industriekettensäge¹² wie sie Pinox und John Deere verwendet oder ein Guillotine Kappsyste m, wie es bei Dingoma und Monra Forestal zum Einsatz kommt. Die Bündeleinheit wird bei allen Anbietern vollautomatisch gesteuert, wozu man eine eigene Steuerungssoftware verwendet, die auf das IQuan- oder DASA-Kontrollsystemen aufgespielt betrieben wird. Pressdruck, Vorschub, Anzahl und Abstand der Wickelungen, Länge der Bündel und Ähnliches sind über die Steuerung einstellbar, so dass eine möglichst optimale Bündelung erreicht und die Arbeitsbelastung für den Maschinenführer minimiert wird (u. a. KANZIAN, 2005). Bei schlechter Qualität der Bündel oder Problemen im Arbeitsablauf kann der Fahrer zu einem manuellen Modus wechseln, so erhöht er beispielsweise bei sehr starkem Material die Anzahl der Wickelungen kurzfristig, um damit einem Aufplatzen der Bündel entgegenzuwirken.

Seit 2009 findet die Bündlertechnologie kaum noch Erwähnung in der Literatur und den Werbekampagnen der Maschinenhersteller. Allenfalls wird ein Rückgang der Technik erwähnt. Laut RÖSER (2009) ist insbesondere in Finnland ein Abbau der Maschinenkapazitäten zu verzeichnen, jedoch weist für Deutschland auch JACKE (2007C) auf die schwierigen Einsatzmöglichkeiten der meisten Maschinen hin. Aufgrund ihrer Arbeitsweise, die quer zur Fahrtrichtung erfolgt, ist ein Einsatz in geschlossenen Waldbeständen auf der Rückegasse schwer praktikabel. Der selbsternannte Marktführer im Bereich Bündler in Deutschland, die Firma Pinox, hat mittlerweile die Produktion eingestellt. In Finnland wurde der Hersteller von einer russischen Gesellschaft übernommen, die die Produktion im skandinavischen Land beendete (PINOX, 2008). Seitdem werden die Pinox-Maschinen zur Kurzholzernte (Harvester, Forwarder) in Russland gefertigt und unter dem Namen Harvy Forester insbesondere für den russischen Markt angeboten (HARVY, 2013; KARE, 2008). Die Namensrechte der Firma Pinox sowie die Produktionsrechte für die Kombimaschine und das Bündleraggregat sicherte sich ein Konsortium aus einer australischen und einer deutschen Firma. Eine erneute Produktion werde angestrebt, habe aber bisher noch nicht begonnen (GABRIEL, 2009). Nachdem einige Jahre auf den Maschinenmessen keine Bündler mehr ausgestellt wurden, war auf der KWF-Tagung 2016 in Rodingen wieder ein Bündler am Messestand der Firma Dutch Dragon zu sehen.

Als Garn zum Umwickeln der Bündel wird ein Polypropylengarn oder eines aus Naturfasern (bspw. Sisal), analog der Umwicklung von Ballen in der Landwirtschaft, verwendet. Für ein Bündel mit drei Metern Umfang liegt der Verbrauch der Standardwickel-einstellung bei circa 60 Metern. Die Garnrollen werden in ein Magazin, das sich um die Bündel dreht, eingelegt.

¹² Das Schwert / die Führungsschiene hat eine Länge von circa einem Meter.

Der Pinox kann bis zu acht Rollen gleichzeitig einsetzen, es existieren zudem zwei Öffnungen, an denen jeweils ein Schnurende aus dem Magazin nach außen zum Wickeln der Bündel austritt. Die übrigen Rollen sind in Reihe miteinander verbunden.

Polypropylengarn besitzt gute mechanische Eigenschaften, ist leicht zu verarbeiten und im Vergleich zu Naturfasern das günstigere Material. Die Verwendung dieses Produktes wird teilweise dadurch begrenzt, dass es ein brandförderndes Garn ist mit einem sogenannten Tropfeffekt. Darüber hinaus kann das nicht stabilisierte Polypropylen durch UV-Strahlung zerfallen und wird bei Temperaturen unter minus 20 Grad Celsius in seiner Struktur brüchig. In den letzten Jahren hat ein finnischer Garnhersteller ein Spezialgarn für den Einsatz bei der Waldrestholz Bündelung entwickelt und auf den Markt gebracht. Dieses zeichnet sich durch eine besonders hohe Reißfestigkeit und einen intensiven UV-Schutz aus, denn die Zugabe von Additiven bei der Herstellung schützt das Garn mehrere Jahre vor einem durch UV-Strahlen bedingten Zerfall. Die Herstellung, Verarbeitung, Verwendung und Entsorgung von Polypropylen bringt keine wesentlichen Umwelt- und Gesundheitsbelastungen mit sich, zudem ist der Energieverbrauch für die Gewinnung und Herstellung gering. Die vollständige Verbrennung von Polypropylengarn führt lediglich zur Emission von Kohlendioxid und Wasser.

Bei Sisal handelt es sich um eine Naturfaser, welche aus den Blättern einiger Agavenarten gewonnen wird. Als pflanzliches Produkt ist es entsprechend vollständig biologisch abbaubar. Zudem zeigt sich Sisal als ausgesprochen zäh und zugfest und im Vergleich zu anderen Fasern als ungewöhnlich steif (Yu, 2005). Jedoch fällt das Naturprodukt im Verhältnis zum Kunststoffgarn deutlich weniger stabil aus, so dass eine höhere Stärke beziehungsweise geringere Lauflänge¹³ verwendet werden muss. Infolge des etwas höheren Preises und der damit einhergehenden Unwirtschaftlichkeit ersetzte die Landwirtschaft die Sisalgarne nahezu vollständig durch Kunststoff. Sisalprodukte bleiben aber weiterhin über den Versandhandel erhältlich.

Die Rückung dieser Bündel aus dem Bestand erfolgt mit einem herkömmlichen Tragschlepper an die nächste Waldstraße, an der die Produkte entweder sofort abgefahren oder wie herkömmliches Stammholz zwischengelagert und gepoltet werden. Bedingt durch diese Anordnung und Organisation laufen alle Teilprozesse der Bereitstellungskette unabhängig voneinander ab.

Den Straßentransport zum Abnehmer führt man mit üblichen oder modifizierten Kurzholztransportern durch (s. Abbildung 21). Insbesondere Fahrzeuge zum Holztransport müssen wechselnden Transportbedingungen zwischen Wald und öffentlicher Straße standhalten (FRIES, 2009) und verfügen meist, so auch die im Rahmen dieser Studie untersuchten Rundholz-Lkw, über eine fahrzeugeigene Ladetechnik. Die hydraulisch angetriebenen Kräne verleihen ihnen zudem eine gewisse Unabhängigkeit, da der Lkw-Fahrer sein Fahrzeug ohne fremde Hilfe mit dem Kran be- und entladen kann. Einen Nachteil stellt jedoch die Masse der Kräne dar, die drei bis vier Tonnen betragen kann und die Größe der Nutzlast entsprechend reduziert (HECKER, 2003). Alternativ können sie durch stationäre oder mobile Holzlader am

¹³ Wickelgarne werden nach Lauflänge (Meter pro Kilogramm) kategorisiert.

Holzlagerplatz ausgeladen werden. Die Führer der Kurzholztransporter haben in der Regel einschlägige Erfahrungen beim Fahren im Wald, kennen die örtlichen Gegebenheiten und die witterungsbedingten Verhältnisse auf den Waldwegen.

Probleme können sich ergeben, wenn sich kurze Holzstücke beim Transport aus den Bündeln lösen. In Finnland werden die Kurzholz-Lkw daher teilweise für den Transport von Bündeln und losem Waldrestholz leicht modifiziert (s. Abbildung 21), indem Leichtbauwände an den Seiten und Gitter an den Stirnflächen installiert werden. In Deutschland setzt man vielfach Netze ein, die verhindern, dass sich Holzstücke lösen und auf die Fahrbahn gelangen.

Bei den Kurzholzzügen ist durch die Wahl des richtigen Fahrzeuges beziehungsweise der entsprechenden Bündellänge darauf zu achten, dass eine möglichst optimale Auslastung des Lkw gewährleistet wird. In der Regel erweist sich bei Transporten dieser Art das Volumen und nicht die Masse als begrenzender Ausladungsfaktor. So sollten unter den deutschen Transportbedingungen pro Ladung mindestens vier Stapel aufgesetzt werden können, die man auch anschließend mit der notwendigen Vorsicht verarbeitet. Da die gewöhnlichen Holzgreifer für Stammholz konstruiert sind, das auch mit einem höheren Anpressdruck manipuliert werden kann, stellt diese Art der Greifer nicht zwingend die ideale Form für den Bündelumschlag dar. Besser bewähren sich Finger-(Zinken)greifer (s. Abbildung 14), wie sie auch bereits bei den Bündlern zum Einsatz kommen. Durch sie ist es nicht mehr notwendig, dass der Greifer die Bündel fest umschließt, des Weiteren verringert sich die Gefahr der versehentlichen Aufnahme von Bodenanhftung beim Anheben von auf dem Grund gelagerten Bündeln.



Abbildung 21: Eigenentladung (links) und Fremdentladung (Mitte, rechts; TIMPERI, 2003) von Bündeln, transportiert mit unterschiedlich modifizierten Rundholz-Lkw.

Als weitere Transportvarianten bieten sich wie schon beim Hackschnitzeltransport Containerfahrzeuge (Abrollcontainer) an, denn durch die geschlossenen Wände ist ein sicherer Straßentransport gewährleistet. Da diese Fahrzeuge in der Regel nicht über einen Kran verfügen, müssen sie durch ein Fremdfahrzeug befüllt werden. Am Entladeort kippt man die Container ab, was den Einsatz eines weiteren Fahrzeugs zum Poltern der Bündel notwendig macht und die Qualität der Bündel hinsichtlich ihrer Form und Stabilität beeinträchtigt.

Die Zerkleinerung der Bündel sollte zentral beim Abnehmer erfolgen, denn nur dadurch kann gewährleistet werden, dass die einzelnen Arbeitssysteme unabhängig voneinander ablaufen. Für diesen Vorgang eignen sich Maschinen mit langsam arbeitenden Werkzeugen, die nach

einer Definition von JACKE (2007B) als Zerspaner titulierte werden. Durch Langsamlauf vollzieht sich eine stückige Zerkleinerung. Die Produktion von Feinteilen, die Entstehung von Staub und Lärm werden derart auf ein Minimum reduziert und der Verschleiß von Maschinenteilen verringert.

Je nach Hersteller sind die Werkzeuge unterschiedlich ausgestaltet. In der Regel handelt es sich um hydraulisch oder direkt angetriebene Wellen (ein bis zwei Wellen je Zerkleinerer), an denen die unterschiedlich stumpfen Werkzeuge, je nach Aufgabegut und Endkorn, befestigt sind. Die Materialaufgabe erfolgt unsortiert in einen muldenförmig ausgebildeten Trichter oberhalb der Maschine. Einige Hersteller (vgl. HAMMEL, 2012) verwenden darüber hinaus einen Kipptrichter, der das Material den Walzen zuführt. Bei den Zweiwellenzerkleinerern laufen die Wellen gegenläufig; Ihr Antrieb geht lastabhängig mittels Hydraulik vonstatten. Bei einer zu hohen Beanspruchung, zum Beispiel durch sehr sperriges Holz, gehen die Wellen, sobald ein Maximaldruck an der Hydraulik (ca. 300 bar) erreicht ist, für einige Sekunden in einen reversierenden Betrieb, so dass sich die Werkzeuge selbstständig reinigen können. Bei Maschinen, bei denen lediglich eine Welle zum Einsatz kommt, die ein Planetengetriebe direkt antreibt, arbeitet die mit Werkzeugen bestückte Welle gegen einen hydraulisch angesteuerten Zerkleinerungskamm. Zum Schutz der Maschine und zur Minimierung des Werkzeugverschleißes öffnet dieser selbsttätig bei massiven Störkörpern (DOPPSTADT, 2012). Der Direktantrieb zeigt sich kraftvoller und effizienter als der hydraulische Antrieb, allerdings können über den geöffneten Kamm Störkörper in das zerkleinerte Hackgut gelangen. Bei beiden Systemen ziehen die Werkzeuge an den Wellen das Material aktiv ohne weitere Materialzuführung über Walzen oder Bänder ein.

Neben den unterschiedlichen Werkzeugen werden bei einigen Maschinen auch verschiedene Siebkörbe angeboten, um die Einhaltung der gewünschten Korngröße zu garantieren. Dabei erfassen die Werkzeuge das Material und drücken es schneidend, spaltend gegen die Schneidleiste und die darunterliegenden Siebkörbe. Letztere sind auf das Schneidwerk abgestimmt, in diversen Abstufungen verfügbar und lassen sich schnell und unkompliziert mit Hilfe eines Krans wechseln. Das Material verlässt den Zerkleinerungsraum erst, wenn die Korngröße der Lochung des eingesetzten Siebkorbes entspricht: Ein Großteil des zerkleinerten Materials liegt somit in dem gewünschten Maß vor (KOMPTech, 2012).

Der werksinterne Transport des zerkleinerten Holzes geschieht in der Regel durch stationäre Förderanlagen, die einen zuverlässigen und ökonomischen Transport sicherstellen.

2.4 Lagerung, Trocknung und Klassierung von Waldrestholz

2.4.1 Lagerung von Waldrestholz

Die Lagerung von Waldrestholz hat differente Ursachen, ist jedoch, gleich welches Arbeitssystem Verwendung findet, ein unverzichtbarer Bestandteil der Verfahren. Die Gründe für eine Lagerung liegen zum einen in der Notwendigkeit zur Überbrückung der Zeitspanne zwischen Anfall und Verbrauch¹⁴, zum anderen in der zur Sicherung der Brennstoffversorgung oder zuletzt in der Sortimentierung des Materials (BEIMGRABEN, 2009). Durch die Lagerung zur Versorgungssicherung können unvorhergesehene Engpässe durch termin- oder mengenungenaue Anlieferungen überbrückt werden, die spekulative Lagerung beugt vermuteten Preisschwankungen beziehungsweise Verknappungen auf dem Beschaffungsmarkt vor (OESTEN ET AL., 2012). Dabei variiert der Lagerort zwischen dem Platz des Holzanfalls im Bestand, der Waldstraße, den Zwischenlagern beziehungsweise Aufbereitungsplätzen oder dem Ort der Verwendung. Auch die Eigentumsgrenzen spielen in diesem Fall eine Rolle, da der Ortswechsel des Materials mit einem Eigentums- und Gefahrenübergang verbunden sein kann.

Laut BEIMGRABEN (2009) birgt die Lagerung von Holz erhebliche Risiken: Zum einen können beträchtliche Substanzverluste auftreten (vgl. WITTKOPF, 2005), wenn das Holz von zersetzenden Pilzen und Bakterien befallen wird. Folge der Verdichtung und bakteriellen Zersetzung ist eine erhöhte Temperatur im Hackschnitzelhaufen, die letztlich sogar zur Selbstentzündung des Holzes führen kann (Verlustrisiko). Neben dem Materialverlust sind zum anderen auch die Verschlechterung der Qualität durch Wiederbefeuchtung, Klumpenbildung durch Frost sowie durch technische Entmischung und Feinabrieb (Qualitätsrisiko) eine Beeinträchtigung der Werthaltigkeit des Holzes möglich. Sogar auf Mensch und Umwelt hat die Lagerung des Waldrestholzes Einfluss, denn infolge von Sporenbildung kann es bei der Manipulation des Holzes zu Gesundheitsgefährdungen kommen (Gefährdungsrisiko). Austretendes Wasser beziehungsweise Sickerwasser und Verbreitung von Geruchsstoffen (Umweltrisiken) werden in diesen Fällen zu einer Belastung für die Umwelt.

Unterschiedlichste Einflussfaktoren bestimmen die Lagerfähigkeit des Holzes und damit das Auftreten der vorgenannten Risiken. Neben dem Zustand des Materials sind der Ort und die Art und Weise der Lagerung entscheidend. Auskunft über die Beschaffenheit des Holzes bieten dabei Qualitätsparameter wie Form, Wassergehalt, Grün- und Feinanteil. Speziell der Wassergehalt wirkt sich auf die Lagerfähigkeit aus: Ein Wassergehalt zwischen 35 und 50 Prozent bietet optimale Bedingungen für das Wachstum von Pilzen und Bakterien (C.A.R.M.E.N., 2008). BEIMGRABEN (2010) konstatiert bei der Lagerung von frischem Waldhackgut (50 - 55 % Wassergehalt) über einen Zeitraum von acht Monaten im unabgedeckten Haufen einen Verlust der Trockenmasse von 20 bis 23 Prozent (2,9 % pro Monat). Nach GOLSER ET AL. (2005) betragen die monatlichen Trockensubstanzverluste bis zu vier Prozent, WEINGARTMANN (1991) spricht sogar von monatlichen Abbauraten bei Hackschnitzeln von bis zu fünf Prozent der Trockenmasse. Hohe Fein-, Rinden- oder Grünanteile (Blätter, Nadeln)

¹⁴ Durch „Pufferung“ sollen Schwankungen der Verfügbarkeit und des Bedarfs von Gütern an Schnittstellen der Wertschöpfungskette ausgeglichen werden.

begünstigen zusätzlich die Aktivität der Mikroorganismen und damit den Substanzabbau (NEFF, 2007).

Erst bei Wassergehalten unter dem Fasersättigungspunkt des Holzes (ca. 25 %) und oberhalb von 65 Prozent Wassergehalt existiert praktisch kein Pilzwachstum. Die Abbauprozesse kommen zum Erliegen. Ein nennenswerter Substanzverlust muss hier nicht mehr befürchtet werden und das Holz ist längerfristig lagerfähig (WITTKOPF, 2005). Doch nicht allein der Wassergehalt ist ein beachtenswerter Faktor: Auch der pH-Wert und die Temperatur des Holzes sowie die Holzinhaltsstoffe beeinflussen die Zersetzung. So können zum Beispiel flüchtige Öle oder Gerbsäuren, wie sie in Eichen vorkommen, hemmend auf das Pilzwachstum einwirken.

Die Struktur des Holzes beeinträchtigt die Lagerung in vielerlei Hinsicht. Waldrestholz kann im Ganzen oder zerkleinert beispielsweise als Waldhackgut gelagert werden. Dabei gilt: Je gröber das Material ist, desto leichter kann Luft zirkulieren. Um die natürliche Trocknung zu fördern, sollte der Schlagabraum daher vor der Zerkleinerung gelagert werden, da die Trockensubstanzverluste deutlich geringer ausfallen als bei der Aufbewahrung von Hackschnitzeln.

Neben den qualitativen Veränderungen des Holzes verursacht eine Einlagerung auch erhebliche, nicht selten unterschätzte Kosten. Hierzu gehören neben den Aufwendungen für Gebäude und befestigte Plätze auch die der Ein- und Auslagerung sowie der laufenden Pflege von Lagergut und -ort. Die Kapitalbindung für das eingelagerte Holz zeigt sich in diesen Fällen als hoch, insbesondere vor dem Hintergrund der potentiellen Wertminderung oder des Verlusts des Lagergutes (OESTEN ET AL., 2012). KÜHMAIER ET AL. (2007) beschäftigen sich ausführlich mit den Kosten und gelangen zu dem Ergebnis, dass die Lagerung von Rohholz auf einem asphaltierten Platz und von Hackschnitzeln in einer Halle je nach Lagerungsdauer (1 - 12 Monate) und Umschlagsmenge (1000 – 500.000 SRm p.a.) Kosten in Höhe von 1,61 bis 19,22 Euro pro Schüttraummeter verursacht. Die Differenz der Beträge ergibt sich aus den durch die Errichtung von Platz und Gebäude entstehenden hohen Fixkosten, was eine Variation der Stückkosten je nach Umschlagsmenge nach sich zieht.

2.4.2 Trocknung von Waldrestholz

Durch die Trocknung von Waldrestholz werden viele qualitätsrelevante Parameter des Holzes positiv beeinflusst (WEBENAU V. ET AL., 1999): Die Lagerfähigkeit, die Masse beim Transport sowie die mechanischen, technischen Eigenschaften, beispielsweise hinsichtlich Quellen und Schrumpfen des Materials. Darüber hinaus wandelt sich der Holzanteil an der Gesamtmasse eines Holzsortiments und dadurch bedingt die Energiedichte und der monetäre Wert. Ferner sind im Bereich Festbrennstoffe mittlerweile viele Verfahren darauf ausgerichtet, einen möglichst standardisierten Brennstoff zu erhalten.

Bei der Holz Trocknung ist die Art der Wasserbindung im Holzkörper von zentraler Bedeutung, denn durch sie wird vorgegeben, mit welcher Kraft das Wasser im Holzkörper gebunden ist. Mit zunehmendem Trocknungsgrad muss eine immer größere Menge an Energie verwendet werden, um dem Holz Wasser zu entziehen. Auf diese Weise haben die Arten der Bindungs-

kräfte Einfluss auf den Trocknungsfortschritt, -aufwand und den mit der jeweiligen Technik erreichbaren Wassergehalt. Der Trocknungsverlauf lässt sich dabei in drei Abschnitte einteilen (s. Tabelle 6): Im ersten Abschnitt trocknet frisches Holz zunächst zügig und mit konstanter Geschwindigkeit. Dabei verdunstet das an der Oberfläche befindliche Wasser und zieht solange Flüssigkeit aus dem Holzinneren an die Oberfläche, bis die kapillare Zugkraft nicht mehr ausreicht. Am Ende dieses Prozesses ist der Fasersättigungspunkt erreicht, an dem kein freies Wasser mehr in den Zellhohlräumen vorhanden ist. In der zweiten Periode verlagert sich der Trocknungsspiegel in das Holzinnere: Das Wasser entweicht in diesem Stadium aus den Zellwänden. Bis das Sorptionsgleichgewicht erreicht ist, reagiert die Holzfeuchte noch konstant auf Schwankungen der Luftfeuchtigkeit. Im letzten Abschnitt sind die Bindungskräfte am größten, hier kann die verbleibende Flüssigkeit nur noch durch technische Trocknung entzogen werden (vgl. u. a. GOLSER ET AL., 2005, ZIMMERMANN ET AL., 2004; EDLER ET AL., 1998; TERLECKI- BRUNNBAUER, 1997; HILDEBRAND, 1979).

Tabelle 6: Abschnitte der Holztrocknung und die Arten der Wasserbindung bei unterschiedlichem Wassergehalt (w) des Holzes.

Abschnitt	Merkmal	Art der Bindungskraft
1. ($w > 25\%$)	Freies, ungebundenes Wasser in den Zellhohlräumen und Gefäßen	Kapillar- und Anhangskräfte
2. ($13\% < w < 25\%$)	Wasser in den Holzfasern und Zellenwänden gebunden	Kapillarkräfte
3. ($0\% < w < 13\%$)	Wasser in den Holzfasern und Zellenwänden gebunden	Elektrische und molekulare Anziehungskräfte

Wesentliche Einflussfaktoren für die natürliche Trocknung von Schlagabraum sind Niederschlag, Durchlüftung, Luftfeuchtigkeit und Sonneneinstrahlung. Ein idealer Lagerplatz zum Vortrocknen des Holzes sollte daher gut durchlüftet und besonnt sein sowie einen trockenen Untergrund aufweisen (WEBENAU V. ET AL., 1999). Grundsätzlich ist damit eine Trocknung im Wald möglich, allerdings im Vergleich zu einem eigens eingerichteten Lagerplatz suboptimal (EBERHARDINGER, 2011). Lichte, exponierte Stellen im Wald oder am Waldrand bieten sich an und versprechen einen besseren Erfolg bei der Trocknung (WITTKOPF, 2005). Stets zu berücksichtigen bleibt allerdings der Platzbedarf des unzerkleinerten Schlagabraums.

Die am Waldrestholz anhaftenden Blätter und Nadeln verstärken im frischen Zustand noch den Wasserentzug, bevor sie dann im Laufe des Trockenvorgangs abfallen. Hierdurch verringert sich der Feinanteil im Waldrestholz, es ist länger lagerfähig und die Qualität verbessert sich. Wird das Material flächig aufbewahrt, verbleiben die nährstoffreichen Feinanteile im Bestand (WITTKOPF, 2005).

Jedoch ist bei einer größeren Anhäufung von frischem Fichtenschlagabraum zu beachten, dass die Ausdünstungen des Materials einen Befall von Schadinsekten (z. B. Fichtenborkenkäfer [*Ips typografus*]; Kupferstecher [*Pityogenes chalcographus*]) nach sich ziehen können, da diese von den Signalstoffen des absterbenden Materials angelockt werden. Dies gilt vorrangig während des Dispersionsfluges (Schwärmflug) der Tiere (i. d. R. im Frühjahr).

Sobald ein Trocknungsgrad des Materials von circa 30 Prozent Wassergehalt unterschritten ist, lassen die olfaktorischen Reize und damit die Gefahr eines Insektenbefalls nach (BENZ ET AL., 1997; SCHWERTFEGER, 1981). Nach GOLSER ET AL. (2005) treten bei der Lagerung von Schlagabraum aus Laubholz keine phytosanitären Probleme auf.

Die Trocknung des Materials erfolgt durch Verdunstung, indem das Wasser im Holz vom flüssigen in den gasförmigen Zustand wechselt. Der Wasserdampf muss von der Luft, die das Objekt umgibt, aufgenommen werden. Dies setzt voraus, dass die Luft noch nicht ausreichend mit Wasser gesättigt ist, das heißt, keine hohe Luftfeuchtigkeit vorliegt. Damit ein Übergang vom flüssigen in den gasförmigen Aggregatzustand stattfinden kann, muss hinlänglich Energie in Form von Wärme zur Verfügung stehen. Bei der natürlichen Trocknung stellt der Wärmevorrat der Luft diese Energie bereit. Unter diesen Bedingungen findet solange eine Verdunstung statt, bis die molekularen Bindungskräfte (Kapillarkräfte) derart groß sind, dass das Wasser in den Holzzellen nicht mehr entweichen kann (s. Tabelle 6).

Die Trocknungsgeschwindigkeit kann entsprechend gesteigert werden, indem der Luftdurchsatz (bspw. an windexponierten Lagerplätzen) oder die Aufnahmefähigkeit der Luft durch Erwärmung erhöht wird (WEBENAU V. ET AL., 1999). Diese Erwärmung ist auch durch biologische Umsetzungsprozesse im Holz möglich.

Aus den in Mitteleuropa vorherrschenden Klimabedingungen resultiert regelmäßig eine Wiederbefeuchtung des Materials. Neben längeren kühleren Perioden im Winter und den Übergangszeiten bedingen gerade auch die relativ hohen Niederschläge in der warmen Jahreszeit eine Unterbrechung der Trocknungsvorgänge und die Zunahme des Wassergehalts im Ausgangsmaterial.

Die technische Trocknung des zerkleinerten Holzes hat in den letzten Jahren an Bedeutung gewonnen, was zum einen den gesetzlichen Regelungen des EEG (2012) geschuldet ist, nach denen bei der Stromerzeugung aus Biomasse ein Mindestanteil der anfallenden Wärme genutzt werden muss, beziehungsweise eine zusätzliche Vergütung bei der Verwendung der anfallenden Wärme in Anspruch genommen werden kann. Zum anderen stieg das Bewusstsein für die Vorteilhaftigkeit trockener Hackschnitzel, was eine erhöhte Nachfrage nach getrocknetem Material nach sich zog (HEINRICH ET AL., 2013).

Bei der technischen Trocknung wird ein durch entsprechende Mittel beeinflusstes Trocknungsklima erzeugt: Der Vorgang speist sich hier aus gezielt gesteuerten Wechselwirkungen zwischen Trocknungsklima und Holz. Ziel der technischen Trocknung ist, das Holz kontrolliert, also schnellstmöglich und mit den vorgegebenen Qualitätsansprüchen ökonomisch effizient zu trocknen (TEISCHINGER, 2012). Im Bereich der Hackschnitzeltrocknung kommen dabei fast ausschließlich Konvektionstrockner, meist in Form der Frischluft-Abluft-Trocknung, zum Einsatz: Hier erhält das Holz die notwendige Energie von der strömenden Luft, welche das Hackgut unmittelbar berührt und sich mit der verdampften Feuchte vermischt. Differenziert werden kann zwischen kontinuierlicher Trocknung im Durchlaufverfahren und diskontinuierlicher Trocknung. Beispiele für die erste Form sind Trommel-, Band- und Schubtrockner (Schubkeil- oder Schubwendetrockner), durch die das Trocknungsgut kontinuierlich geführt wird. Beim zweiten, dem diskontinuierlichen Verfahren verwendet man beispielsweise Con-

tainer, Schüttgutanhänger oder Lagerhallen. Hierbei strömt die Trocknungsluft in der Regel durch den perforierten Boden der Behälter in das Trockengut und nimmt somit die Feuchtigkeit auf. Nachdem der gewünschte Trocknungsgrad erreicht ist, leert man den Lagerraum, um ihn anschließend mit frischem Material neu zu bestücken. Mittlerweile existieren Komplettsysteme auf dem Markt, bei denen eine elektronische Steuerung den Prozess regelt.

Stationäre, großtechnische Trockner sind meistens als kontinuierlich beziehungsweise im Durchlauf trocknende Anlagen bei einer zentralen Aufbereitung des Holzes installiert. Die Trommeltrocknung ist dabei eine seit langem bewährte, industrielle Trocknungsanwendung, die sich durch eine hohe Trocknungskapazität sowie -genauigkeit auszeichnet und daher im Rahmen der Herstellung von Spanplatten ausschließlich zum Einsatz kommt (FRISCHE, 2013). Als Besonderheiten sind hierbei die hohe Temperatur der zugeführten Trocknungsgase und der geringe spezifische Wärmebedarf zu nennen.

2.4.3 Siebklassierung von Waldrestholz

Um einen standardisierten Rohstoff aus Waldrestholz zu erzielen, ist auch die Einhaltung geometrischer Normen notwendig. Da die bloße Zerkleinerung, insbesondere von Waldrestholz, diese oft nicht gewährleisten kann, wird dem Prozess die Siebklassierung und damit die Trennung der Hackschnitzel nach charakteristischen geometrischen Abmessungen nachgeschaltet. Hierbei wird das Aufgabematerial durch den Siebbelag mit Öffnungen einer definierten Größe separiert und landet entweder im Überlauf (Grobgut) oder im Durchgang (Feinkorn). Je nach gewünschter Hackschnitzelgröße lassen sich die beiden entstandenen Fraktionen weiter aufteilen. Ausgesiebtes Feinkorn, das aufgrund seiner zu kleinen Stückgröße unbrauchbar ist, bezeichnet man als Unter- oder Fehlkorn (SCHUBERT, 1989).

Die Leistungsfähigkeit einer Siebmaschine kennzeichnet man durch den spezifischen Siebdurchsatz und den Siebgütegrad (auch Trennschärfe genannt). Ersterer stellt die Aufgabemenge (als Massestrom, besser als Volumenstrom) bezogen auf die verfügbare Siebfläche dar. Letzterer gibt wieder, wie viel des im Aufgabegut enthaltenen Feinguts tatsächlich durch den Siebbelag in den Durchgang gelangt.

Ausgehend von der Siebgutbewegung auf dem Siebboden lassen sich die Siebapparate in mehrere Kategorien differenzieren: Neben den in der Holzwerkstoffindustrie verwendeten stationären Plansiebanlagen mit einem festen Rost hat sich in den letzten Jahren auch eine Reihe von mobilen Anlagen am Markt etabliert, die einem industriellen Anspruch genügen. Im mobilen Einsatz trifft man dabei vorrangig Wälzsiebe (Trommelsieb) und bewegte Roste (Sternsiebanlagen) an, durch die es möglich ist, zwei bis drei Fraktionen abzusondern.

Zwar sind diese Siebtechniken auch als stationäre Aufbauten erhältlich, allerdings kommen bei großtechnischen Anlagen in der Regel Plan- oder Wurfsiebanlagen zum Einsatz, bei denen das Siebgut auf einer horizontalen Lochmatritze durch Schwingungen getrennt und leicht aufgelockert wird. Der Unterschied zwischen einem Plan- und einem Wurfsieb zeigt sich darin, dass Erstere in der Ebene des Siebbelages schwingen, während Letztere durch kreisförmige oder lineare, vertikal zum Siebbelag ausgerichtete Bewegungen in Schwingung versetzt werden. Vorteile der Siebanlagen mit festen Rosten sind die Trennung des Hackguts

in zahlreiche Fraktionen durch eine Maschine, die Verwendung unterschiedlicher Lochbleche sowie der große Materialdurchsatz bei geringem Energieaufwand und Verschleiß. So lassen sich sehr exakte, kleinstufige Fraktionen erzielen. Die Siebe eignen sich besonders für die Fehlkornabsiebung (UHLIG, 1992).

Bei einem Trommelsieb bewegt sich das Siebgut in Achsrichtung durch die leicht geneigte Siebtrommel. Bei diesem Vorgang wird es permanent hochgehoben und abgerollt, wodurch sich das Siebgut immer wieder durchmischt. Da sich durch diesen sich stets wiederholenden Prozess auch verklumptes, zusammenhaftendes Material voneinander löst, ist dann zum Einsatz eines Trommelsiebes zu raten, wenn eine gute Vereinzelung und Homogenisierung des Materials erzielt werden soll. Doch auch hier gibt es einen signifikanten Nachteil: Es erfolgt nur ein geringer spezifischer Durchsatz, da aufgrund der Bauweise lediglich etwa 30 Prozent der vorhandenen Siebfläche genutzt werden. Hieraus resultiert ein relativ hoher Energiebedarf beim Betrieb der Siebanlage, der leicht das Dreifache des Bedarfs einer Plansiebanlage betragen kann (STIEß, 1994). Zudem bleibt die mangelnde Selbstreinigung des Siebbelags, insbesondere bei feuchtem Material, zu erwähnen. Es verklemmen sich gelegentlich Holzstücke in den Sieblöchern, die sich nur schwer von alleine lösen. Aus diesem Grund bieten die meisten Hersteller geeignete konstruktionstechnische Lösungen an, beispielsweise eine Bürste, die die Reinigung des Siebbelags von außen übernimmt.

Sternsiebanlagen bestehen in der Regel aus mehreren stufenförmig angeordneten Ebenen, die sich jeweils aus hintereinander, parallel und quer zur Förderrichtung montierten Wellen zusammensetzen. Auf den Wellen sind die Förderscheiben, die auch Rostscheiben oder Sterne genannt werden, derart angebracht, dass sie beim Betrieb ineinandergreifen. Die Form und ihr seitlicher Abstand zueinander sowie der Zwischenraum zwischen den Walzen bestimmt hierbei die Trennkorngröße. Darüber hinaus lässt sich die gewünschte Korngröße - im Rahmen der von der Sterngeometrie vorgegebenen Bandbreite - durch unterschiedlich hohe Rotationsgeschwindigkeiten der synchron betriebenen Wellen beeinflussen. Die Sterne sind dabei so konstruiert, dass sie sich eigenständig reinigen. Die Wellen drehen sich synchron in die gleiche Richtung, so dass das Feingut durch die Spalten zwischen den Siebsterne hindurch fällt und das Überkorn von den gebogenen Fingern der Siebsterne jeweils in Förderrichtung weiter zum Austrag geworfen wird (s. Abbildung 22). Dieser Wurfefekt vermittelt den Eindruck, dass das Material auf dem Siebdeck tanzt. Die Sternsiebanlagen ermöglichen es durch diese Techniken, dass einerseits Ballungen aufgelöst und somit der Gutkornanteil vergrößert und andererseits die Überdeckung der Durchlassschlitze durch das Überkorn verhindert wird.

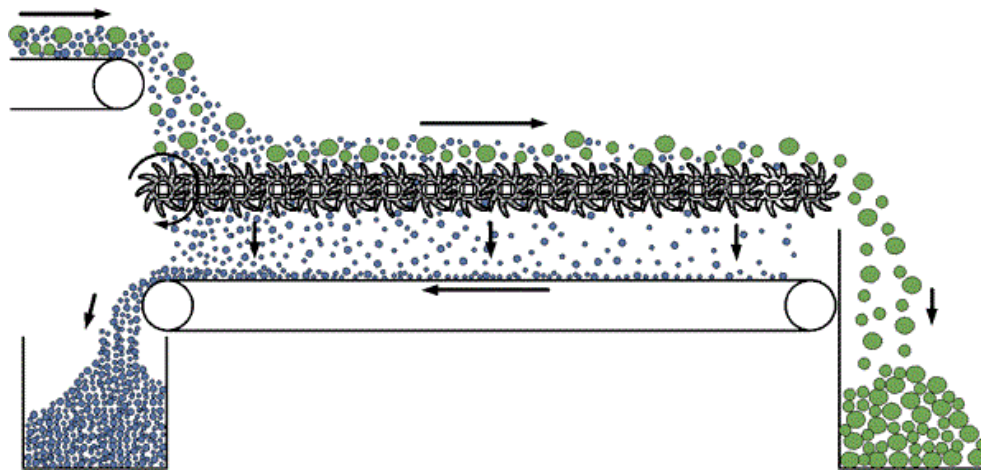


Abbildung 22: Funktionsprinzip eines Sternsieves (MACK, 2013; verändert).

Bei Verschleiß und Wartung können auch separat einzelne Sterne ausgetauscht werden, was eine Kostenminderung zur Folge hat. Probleme können allerdings entstehen, sofern das Siebmaterial ungleichmäßig aufgetragen wird, denn durch eine zu große Füllhöhe auf dem Siebdeck kommt es zum Überfahren des Siebes. Eine ordnungsgemäße Absiebung kann unter Umständen in diesem Fall nicht mehr erzielt werden.

2.5 Abrechnungsmöglichkeiten

2.5.1 Abrechnung nach Volumen

Der Waldbesitzer rechnet sein Holz in der Regel mit dem Holzkäufer durch eine Volumenbestimmung des (aufgesetzten) Holzes im Wald oder am Waldweg ab. Die Volumenermittlung von gehacktem Holz ist einfach und erfolgt in der Regel über die Füllhöhe in den Transportbehältnissen. Hierbei gibt beispielsweise der Lkw-Fahrer das Volumen an, indem er die Ladung abschätzt, Schüttkegel und Ähnliches dabei berücksichtigt. Eine gewisse Erfahrung ist notwendig. Das ermittelte Volumen dient anschließend zur Abrechnung mit dem Waldbesitzer, dem Hackerunternehmer und mit weiteren an der Bereitstellungskette beteiligten Unternehmen. Eine Gegenkontrolle durch den Abnehmer ist möglich. Die Einschätzung des Ladeguts kann durchaus voneinander abweichen, da sich das Hackgut während der Fahrt setzt und verdichtet. Auch die rein visuelle Aufnahme ist fehleranfällig. Jedoch sind die Abweichungen gewöhnlich gering, da die Größe der Transportbehältnisse in der Regel bekannt ist. Der Vorteil der Volumenschätzung liegt insbesondere in der einfachen und günstigen Erhebung sowie dem sofortigen Vorliegen der Ergebnisse. Dadurch können verschiedene Teilmengen und Lieferanten problemlos abgerechnet werden (GOLSER ET AL., 2004).

Schwieriger ist die Ermittlung des geladenen Gutes, wenn diese nach der Zerkleinerung an einem Schütthaufen vorgenommen werden soll. Man kann in diesem Fall näherungsweise über die Berechnung des Volumens eines Kegels zu einem Ergebnis gelangen, allerdings weichen zum einen die tatsächlichen Schütthaufen häufig von der Geometrie eines geraden Kegels ab und zum anderen sind zur Volumenbestimmung die Höhe und der Radius (Grund-

fläche) des Kegels notwendig. Je nach Größe des Schütthaufens können die Variablen schwer zu bestimmen sein.

Das Hauptproblem der Abrechnung nach Volumen verkörpert die große Unsicherheit über die Qualität beziehungsweise die Masse der Lieferung. Somit werden die Dichte des Holzes und die Schüttdichte der Hackschnitzel, die jeweils stark variieren können, nur unzureichend wiedergegeben. Zwar differenziert man meist zwischen Laub- und Nadelholz oder hebt besonders trockenes Material hervor, aber alleine am Volumen ist dies nicht zu erkennen und unterliegt infolgedessen einer recht subjektiven Wahrnehmung. Bedingt durch diese Situation zeigt sich der Anreiz, die Qualität der Lieferungen zu verbessern und die Zusammensetzungen der gelieferten Holzsortimente zu optimieren, als eher gering. Konflikte bezüglich der unterschiedlichen Lieferqualitäten sind oft unausweichlich (GOLSER ET AL., 2004).

Bei einer Lagerung von Waldrestholz am Waldweg kommt es häufig zu einer großen Zeitspanne zwischen Bergung des Materials von der Fläche und der weiteren Verarbeitung am Waldweg. Um eine Abschlagszahlung vom Rückeunternehmen und gegebenenfalls dem Waldbesitzer vornehmen zu können, findet teilweise die Volumenermittlung am Waldrestholzpolter und eine anschließende Umrechnung in Masse oder Volumen des Hackguts statt. Da hierbei zahlreiche Faktoren eine Rolle spielen, ist bei der Aufnahme eher von einer Schätzung denn von einer zuverlässigen Datenerhebung auszugehen. Nichtsdestotrotz fußt auf der Vorabschätzung die Vereinbarung der Abschlagszahlungen. Der Abnehmer der Holzhackschnitzel profitiert von der Lagerung und damit der Abtrocknung des Materials und der Vorratshaltung.

2.5.2 Abrechnung nach Holzmasse

Die Holzindustrie verwendet seit vielen Jahren das Werkseingangsmaß als Grundlage der Berechnung. Beim Industrieholz wird dafür das angelieferte Holz gewogen und es werden Proben für eine Bestimmung des Wassergehalts entnommen. Die Bearbeitung erfolgt dann auf Basis der Trockenmasse (Tonne atro [t_{atro}]). Bei der Abrechnung anhand der Masse des Holzes kommt der Ermittlung des Wassergehalts eine nicht zu unterschätzende Bedeutung zu: Eine falsche Annahme des Wassergehalts hat weitreichende Konsequenzen bei der Abrechnung nach Masse. Dies liegt zum einen an der Tatsache, dass der massebezogene Energieinhalt von Holz stark von dieser Größe abhängt, zum anderen daran, dass der Abnehmer nicht für das im Holz befindliche Wasser bezahlen möchte. WITTKOPF (2005) weist gar einen Fehler von 20 Prozent bei der Ermittlung des Energiegehaltes aus, wenn der Wassergehalt im Holz irrtümlich um 10 Prozent zu hoch beziehungsweise zu niedrig geschätzt wird. Bei der Abrechnung nach Masse ist deshalb die Ermittlung des Wassergehaltes unabdingbar.

Nimmt man eine Berechnung nach Masse und Feuchte des Holzes vor, wird jedoch eine umfangreichere Infrastruktur am Ort der Abnahme notwendig: Neben einer geeigneten und geeichten Lkw-Waage muss eine Einrichtung vorhanden sein, mit der Stichproben zur Bestimmung des Wassergehalts aus dem Material entnommen werden können. Darüber hinaus ist es zwingend, dass eine Lagerung der Proben in Kühlräumen oder die direkte Untersu-

chung in Öfen vonstattengeht. Bei den bekannten gängigen Verfahren wird der Wassergehalt anhand von Hackschnitzelproben eruiert. Kommt es zur Anlieferung von losem oder gebündeltem Schlagabraum, der vor der Zerkleinerung am Werk zwischengelagert wird, existieren keine verlässlichen Methoden zur Probennahme.

Die Bestimmung von Holzarten und unterschiedlichen Schüttdichten spielen bei der Abrechnung nach Masse selten eine Rolle (GOLSER ET AL., 2004). Sofern der Wassergehalt korrekt ermittelt wird, spiegelt sich die höhere Dichte, beispielsweise der Hartlaubhölzer, in der Masse wider. Die Heizwerte je Kilogramm der einzelnen Baumarten unterscheiden sich ebenfalls kaum.

Bei der Abrechnung nach Masse ist es üblich, mit Abschlägen für erbrachte Leistungen zu operieren, da eine Bestimmung der Abrechnungsmenge erst nach erfolgter Messung im Werk durchgeführt werden kann. Da eine Zwischenlagerung im Wald oft angedacht und gewünscht ist, folgt eine erhebliche zeitliche Unterbrechung zwischen der Bereitstellung von Waldrestholz (z. B. am Waldweg) und der Verwendung beziehungsweise Messung im Werk. Abschlagszahlungen zur Aufrechterhaltung der Liquidität der Dienstleistungsunternehmen bergen ein gewisses Risiko für Lieferanten und Abnehmer: Da die tatsächliche Menge nicht geläufig ist, resultiert aus der Schätzung zwangsläufig eine Über- oder Unterzahlung. Bei allen Abschlagsrechnungen geht man von einem angenommenen Wert aus, was zur Konsequenz hat, dass der Dienstleister sich darauf einstellen muss, einen bestimmten Prozentsatz der Erlöse nicht direkt, sondern zeitlich versetzt zu erhalten. Eine Aufstellung und Planung der Firmenliquidität zeigt sich entsprechend unabdingbar. Auch eine Überzahlung des Lieferanten durch den Abnehmer ist in der Praxis keine Seltenheit.

Dennoch bietet das Verfahren eine hohe Genauigkeit und damit die Grundlage einer gerechten Verteilung unter Berücksichtigung gewisser Qualitätsparameter. Entsprechend ist diese Abrechnungsmethode auch heute noch die gängigste Variante bei Holzlieferungen an die Industrie. Nachteilig zeigt sich der hohe manuelle Aufwand für Probenentnahme und Messung, wobei dieser Prozess heutzutage durchaus auch vollautomatisiert ablaufen kann (GOLSER ET AL., 2004). Teilweise existieren auch Anlagen, in denen die Messung online im Durchlauf, zum Beispiel durch Infrarotmessung am Förderband, ohne menschliches Zutun erfolgt. Die Mikrowellen-Feuchtemessung erfasst das gesamte Materialvolumen auf einem Förderband und ist dadurch äußerst aussagekräftig. Aufgrund der Echtzeitinformationen bieten solche Systeme einen ersichtlichen Vorteil.

2.5.3 Abrechnung nach Gütern oder Energie

Bei einer energetischen Nutzung wird das Holz verbrannt, um Energie zu erzeugen. Entsprechend sinnvoll wäre es, wenn sich die Verkaufseinheit und ihre Bewertung am Energieinhalt orientierten.

Die Abrechnung nach der Menge an produzierten Gütern oder Energie bietet die maximale Kalkulationssicherheit für den Produzenten. Dieser kennt dadurch die exakten Kosten für den Rohstoffbezug bereits im Vorfeld und kann seine Verkaufspreise entsprechend ausrichten. Das Risiko wechselnder Rohstoffqualitäten trägt der Lieferant.

Kritisch wird es für diesen, wenn eine Qualitätsverschlechterung während der Lagerung beim Produzenten, das heißt ohne sein Zutun, einsetzt. Ebenfalls kann es sich für den Lieferanten nachteilig auswirken, dass er keinen Einfluss auf die Steuerung der Produktionsabläufe und damit auf den effizienten Rohstoffeinsatz besitzt. So steigen etwa die Kosten für den Produzenten nicht, wenn er aufgrund mangelnder Wartung seiner Heizanlage einen höheren Rohstoffbedarf beanspruchen muss. Im Gegensatz dazu erhöht sich in diesem Fall aber der Aufwand für den Lieferanten, da er für den gleichen Betrag (bemessen beispielsweise an der produzierten Energie) eine größere Holzmenge zu liefern hat. Bei allen negativen Punkten schafft diese Abrechnungsmethode einen Anreiz, gute Qualität und termingerecht zu liefern. Bedingt durch die starken Verflechtungen von Lieferanten und Abnehmer untereinander kann man in diesem Fall im unternehmerischen, wenn auch nicht gesellschaftsrechtlichen Sinn beinahe von einer Mitunternehmerschaft des Lieferanten sprechen.

Durch die vorgenannten Herausforderungen bleibt es jedoch für den Lieferanten schwierig, den Preis für seine Ware zu kalkulieren. Signifikante Faktoren wie der Jahresnutzungsgrad der Produktionsanlagen und die Rohstoffintensität sind dem Lieferanten oft nicht bekannt oder können sich im Laufe der Produktion verändern.

Die Abrechnung nach Produktionseinheiten kommt außerdem nur einem Sinn zu, sofern es je Produktionsanlage nur einen Lieferanten gibt. Wenn mehrere Zulieferer tätig sind, muss die anteilige Liefermenge der unterschiedlichen Lieferanten bestimmt werden, was wiederum durch eine der bereits genannten Abrechnungsalternativen erfolgen müsste. Unter diesen Umständen muss der Erlös proportional über die Produktionsmenge aufgeteilt werden, wodurch es zur doppelten Abrechnung kommt. Da es im industriellen Maßstab äußerst selten ist, dass je Werk nur ein Lieferant existiert, findet diese Abrechnungsvariante keinen Einsatz.

2.6 Informationsfluss in der Logistikkette

Der große Holzbedarf der industriellen Abnehmer setzt eine professionelle Abwicklung der Rohholzbeschaffung voraus, so dass die Anlagen kontinuierlich beliefert werden können. Ziel ist es, die Durchlaufzeiten der Rohstoffe so kurz wie möglich zu gestalten - bei möglichst geringen Transaktionskosten. Die unterschiedlichen Leistungen bei der Rohholzbeschaffung sollen gleichsam standardisiert und transparent erfolgen (LEMM, 2009): Hierbei helfen spezielle Computeranwendungen, die eine Bündelung des Holzangebots garantieren. In diesem Bereich, aber ebenso auf dem Feld des Informationsflusses insgesamt waren in den letzten Jahren deutliche Entwicklungen zu verzeichnen (HEDDEN, 2009).

Während sich die EDV-gestützten Planungsinstrumente innerhalb der Rundholzlogistik bereits in der Praxis etabliert haben, sind diese für die Bereitstellung von Waldrestholz noch kaum im Einsatz (WINDISCH ET AL., 2010). Die hohen Logistikkosten bei der Waldrestholzbereitstellung sprechen aber für die Etablierung einer Logistiksoftwarelösung. Insbesondere bei einer industriellen Verwendung des Waldrestholzes und dem damit verbundenen größeren Einzugsgebiet der Holzbeschaffung steigt der Logistikaufwand. Das Bedarfsdeckungsrisiko für die Abnehmer nimmt zu. Gleiches gilt, wie beschrieben, für den Organisationsaufwand zur Koordinierung der Materialströme. Hinzu treten die verschärften rechtlichen Rahmenbedin-

gungen, die vor allem den Lkw-Transport betreffen: Intensive Kontrollen der Lenkzeiten und der zulässigen Gesamtmasse wurden eingeführt, deren Verstöße man mit drastischen Strafen ahndet. Ob dieser Praxis ist eine sinnvolle Tourenplanung umso notwendiger. Hierfür fehlte es in der Vergangenheit allerdings an alltagstauglichen Systemen für Tourenplanung und Disposition. Die Folge waren Medienbrüche und ein unzureichender sowie zeitlich verzögerter Informationsfluss. Hiervon betroffen sind vorrangig die kleinen und mittelständischen Unternehmen entlang der Logistikkette. Man kann von einem Mangel an vernetzter Kommunikation sprechen.

Sogenannte ‚*Informations- und Kommunikationstechnologien*‘ (IKT) sollen die Informations- und Materialflüsse in der Logistikkette optimieren. Sie dienen als Verbundlösungen für den Datenaustausch bei sämtlichen Transport-, Lager- und Umschlagvorgängen innerhalb eines Betriebs oder zwischen den Partnern. Sie überwachen und steuern die zielgemäßen Prozesse der Raum- und Zeitüberbrückung von Sachgütern und wirken auf die Steuerungs- und Regelungsabläufe ein (OESTEN ET AL., 2012). Grundlage solcher Systeme ist, dass die für den Verkaufs- und Transportvorgang notwendigen Daten mit geringstem Aufwand ohne Übertragungsfehler erhoben, weiterverarbeitet und zeitnah allen Beteiligten verfügbar gemacht werden (HUBER ET AL., 2008). Die aktuellen Datenlagen helfen, die Informationstransparenz zu erhöhen und die Planungsgrundlage zu verbessern (STIEGLER, 2005).

Oft bestehen die technischen Lösungsansätze aus mehreren Teilmodulen, wobei ein umfangreiches Poltermanagement das zentrale darstellt. Hier erfolgt die Polteridentifizierung. Dies bedeutet, dass Informationen zum gelagerten Material (Menge, Holzart, Qualität etc.), zu dem Lagerort und den Besitzverhältnissen beziehungsweise den tätigen Unternehmen gesammelt werden und man diese durch zusätzliche Aufgaben wie die Lagerdarstellung, die Datenzusammenstellung für das Controlling sowie die teilzentralisierte Disposition ergänzt. Von besonderer Bedeutung ist hierbei, dass das Poltermanagement vollständig in die übrigen Module integriert werden kann und Schnittstellen für die Anbindung an alternative Software bereitstellt. Weitere Module sind die Einbindung in Warenwirtschaftssysteme und die Tourenplanung gegebenenfalls mit Navigation auf Waldwegen. Je nach Ausführung kann die spezifische Logistiksoftware in ein Standardwerkzeug der Warenverwaltung (bspw. SAP) eingebunden werden oder eine eigene Plattform für die Warenwirtschaft verkörpern. Welche Option genutzt wird, ist letztendlich unerheblich, es müssen jedoch alle abrechnungsrelevanten Holzdaten in ihr geführt werden. Eine Tourenplanung und -optimierung hilft, teure Leerfahrtanteile zu reduzieren, Gesamtkilometer zu vermindern und Verlustmengen zu vermeiden. Dies geschieht zum einen unter Einbeziehung von Polterdaten im Absprungs- und Zielgebiet sowie zum anderen möglicherweise durch eine Tourenergänzung im Zielgebiet. Berücksichtigt werden in diesem Kontext die maximale Zuladung der Lkw und die gesetzlichen Fahrerarbeitszeiten (digitaler Fahrtenschreiber). Im Idealfall werden die Angaben der Tourenplanung im Anschluss automatisch in eine On-/ Offroadnavigation überführt. Ziel ist es unter anderem, durch das digitale Kartenmaterial Fahrten zu vereinfachen und den Zeitaufwand bei der Poltersuche auf ein Minimum zu beschränken.

Des Weiteren soll bei Verwendung von IKT der Personal- und Maschineneinsatz effektiver gestaltet werden, wobei dies durch die erwähnten Orientierungshilfen für die Bediener und

Fahrer der Maschinen, aber auch durch verkürzte Einweisungszeiten durch das Forstpersonal geschieht (STIEGLER, 2005). Hierbei ist jedoch ein Vorteil für die Beteiligten nur dann zu erzielen, wenn sich die Dateneingabe einfach gestaltet und keinen großen Zeitaufwand mit sich bringt. Alle beteiligten Personen müssen sicher im Umgang mit der Technik sein, um Fehler zu vermeiden und die Datenbasis aktuell zu halten. Dabei spielt heutzutage auch die Abhängigkeit von Satelliten- und Mobilfunkempfang eine Rolle. Hohe Investitionskosten in Soft- und Hardware sowie hohe laufende Kosten können den wirtschaftlichen Nutzen von IKT gefährden (HEDDEN, 2009).

Die Waldrestholzbereitstellung erfordert unter Umständen besonders hohe Anforderungen an die Logistikkette - vor allem bei der Hackung im Wald folgen massive Abhängigkeiten, da die Zerkleinerung und der anschließende Transport sehr großen Einfluss auf den jeweils anderen Prozess haben. Neben den zuvor bezeichneten Relationen der einzelnen Prozesse in der geschlossenen Arbeitskette („*Hot Chain*“; vgl. RÖSER ET AL., 2011) existieren darüber hinaus unterschiedliche Akteure entlang der Bereitstellungskette mit abwechselnden Eigentumsübergängen und Aufgabenbereichen. Durch diese Fakten bedingt, erscheint die Einbindung in ein IKT besonders lohnenswert, aber auch diffizil. Es müssen Unternehmensgrenzen überwunden und Vertrauen zwischen den Partnern der Logistikkette geschaffen werden. Hier befinden sich nach Ansicht von DREEKE (2001) und FORBRIG ET AL. (2001) die größten Hindernisse bei der Einrichtung einer homogenen Datenschnittstelle. Die zur Aufnahme eines einheitlichen Knotenpunktes benötigten Informationen, die durch die Partner der Logistikkette eingegeben werden müssen, sind umfangreich. Hierzu zählen nach BODELSCHWINGH (2010) unter anderem:

- Bereitstellungsanzeige durch den Forstbetrieb
- Übernahme an der Waldstraße
- Holzflussmanagement
- Wald- / Dispositionsmaß
- Anliefermengen inkl. Qualitätseinschätzung
- Werksmaße u. v. m.

Die Schnittstellen erweisen sich als fragil; von einer durchgängigen Transparenz über den Logistikprozess kann in diesem Fall nur binnen einer Gruppe die Rede sein.

Besonderheiten innerhalb der Waldrestholzbereitstellung können bei der Implementierung in Softwarelösungen ebenfalls Probleme bereiten. Ein großer Unsicherheitsfaktor liegt dabei einerseits in der Einschätzung der Holzmengen und -qualität, andererseits führt die Qualitäts- und Volumenveränderung innerhalb der Bereitstellungskette zu Irritationen und Konflikten. Sofern es nicht gelingt, die Programme auf die Besonderheiten zu adaptieren, kann der Einsatz von IKT auch kontraproduktiv wirken.

Je anspruchsvoller jedoch die Logistik ist, desto eher bietet sich die Verwendung computergestützter Technologien an. Am Beispiel der dezentralen Holzhackung am Waldweg treten die umfangreichen Aufgaben bei der Aufsicht der Abläufe zutage: Es müssen Informationen über erfolgte Holzernteeinsätze und möglicherweise angefallene Restholzmengen eruiert und die Flächen beziehungsweise Holzlager vor Ort in Augenschein genommen werden. Für eine gute Hackerauslastung ist es nötig, die Lagerstätten zusammenzufassen und zu konzentrie-

ren. Die sich anschließende Anfertigung von Kartenmaterial und Arbeitsanweisungen müssen an die beteiligten Hacker- und Transportunternehmen übermittelt werden (vgl. KÜHMAIER ET AL., 2007). Unter Umständen ist an dieser Stelle eine Eigentums- und Aufgabengrenze erreicht, so dass bestenfalls die notwendigen, vorhandenen Informationen an das nächste Kettenglied weitergereicht werden.

Im Rahmen einer industriellen Nutzung von Waldrestholz ist für die Verwaltung großer Holzmengen die Inanspruchnahme von IKT nahezu unerlässlich. Dabei liegen die Schwerpunkte auch im Bereich der Lagerhaltung, inklusive der Verhinderung von Verlusten durch zeitliche Überschneidungen oder das Nichtauffinden beziehungsweise Vergessen von Lagerplätzen. Die Kenntnis der Qualität und Menge der Holzlager kann entscheidende Hinweise bei der Beschaffungsplanung liefern.

Im Bereich der zentralen Zerkleinerung in Zusammenhang mit der Bündeltechnik ist die einfachere Abschätzung von Qualität und Menge vorteilhaft, so dass in weiten Teilen auf die vorhandene Soft- und Hardware in der Rundholzbereitstellung rekuriert werden kann.

Trotz aller Softwarelösungen „[...] *liegt der Schlüssel zu erfolgreicher Logistik allerdings vor allem in der effizienten Kommunikation und dem partnerschaftlichen Miteinander aller Beteiligten der Wertschöpfungskette*“ (HUBER ET AL., 2008; S. 4).

3 Methoden

3.1 Überblick

Der quantitative Methodenteil der vorliegenden Arbeit umfasst Fallstudien im Fortschrittszeitverfahren sowie die Erfassung und Auswertung von Hiebs- und Stundenprotokollen. Tabelle 7 gibt einen Überblick über die verwendeten methodischen Werkzeuge im Kontext der Feldstudien.

Tabelle 7: Überblick über die Methoden der Datenerhebung bei den Feldstudien.

	Zerkleinerung am Werk				Zerkleinerung im Wald		
	Bündeln	Rücken	Transport	Sortimentierung	Rücken	Zerkleinerung	Transport
Hiebsprotokoll	X				X		
Stundenprotokoll	X	X	X			X	
Zeitstudie			X	X			X

Daneben werden die Verfahren hinsichtlich ihrer qualitativen Eigenschaften taxiert, indem die praktischen Problemstellungen in den Vordergrund rücken. Die Beurteilung zieht weiche Faktoren wie Kommunikation, Einbindung in vorhandene Systeme und Einfluss auf die Produktqualität heran. Die vorliegende Arbeit setzt qualitative Methoden im Rahmen der Literaturauswertung um, wobei spezifische Merkmale bei der Waldrestholzverwendung (vgl. Kapitel 2.2), -abrechnung (vgl. Kapitel 2.5) und Einbindung in vorhandene Logistikkonzepte (vgl. Kapitel 2.6) im Forschungsüberblick dargestellt werden. Der Analyse- und Auswertungsprozess bezieht diese Daten ein und berücksichtigt sie bei der Beurteilung der einzelnen Arbeitsverfahren.

3.2 Zerkleinerung im Wald

3.2.1 Teilprozess Rückung Schlagabraum

Die im Rahmen dieses Kapitels angestellten Untersuchungen finden in einem Privatwaldrevier im Sauerland statt, welches erheblich durch den Sturm ‚Kyrill‘ im Januar 2007 beeinträchtigt wurde. Durch den Sturm kam es auf großer Fläche zu einem vollständigen Wurf der Fichtenaltbestände. In Randbeständen war zudem auch ein einzelstammweiser Wurf zu beobachten. Die Aufarbeitung des geworfenen Holzes erfolgt vollmechanisiert durch Harvester und Forwarder, im Wesentlichen wird das Stammholz lang ausgehalten. Kronen- und Erdstammstücke werden als Industrieholz kurz eingeschnitten, eine mögliche weitere Verwendung des Schlagabraums wird nicht berücksichtigt. Mehrere Monate nach Abschluss der Holzaufarbeitung folgt eine Räumung der Flächen zur Pflanzvorbereitung, zu diesem Zweck sollen die Wipfelstücke und loses Astmaterial bestmöglich von der Fläche an den nächstgelegenen Waldweg gefahren werden, um es durch mobile Hackung oder Bündelung einer Nutzung zu zuführen.

Die Abrechnung der Flächenräumung erfolgt auf Basis der Betriebsstunden der Forwarder: Um dabei eine Nachkalkulation der Wirtschaftlichkeit vorzunehmen, werden die Betriebsstunden flächenweise, eingeteilt nach den Abteilungs- beziehungsweise übrigen Flächengrenzen, aufgeführt. Die Polterung des Schlagabraums vollzieht sich ferner innerhalb dieser Grenzen, so dass im Anschluss an die Zerkleinerung des Schlagabraums die angefallenen Schüttraummeter je Flächeneinheit bekannt sind. Zur Rückung von losem Schlagabraum kommt im vorliegenden Fall ein konventioneller Tragschlepper Timberjack 1010B zum Einsatz. Es handelt sich hierbei um eine Sechsradmaschine mit einem 10 Meter langen Kran; die Ladefläche weist einen Querschnitt von 4 Quadratmetern und eine Zuladung von etwa 11 Tonnen auf.

Zur Ermittlung der technischen Arbeitsproduktivität bei der Rückung von Schlagabraum wird in Ergänzung zu den Literatursauswertungen auf Hiebsprotokolle zurückgegriffen. Dabei werden folgende Angaben gemacht: Bezeichnung des Hiebs (Abteilung / Unterabteilung), benötigte Betriebsstunden der Maschine, Rückeentfernung, Holzvolumen. Die Betrachtungseinheit ist somit die Fläche, gegliedert nach den Abteilungsgrenzen. Die Betriebsstunden, abgelesen am Steuerungssystem der Maschinen, sind systembedingt auf volle Stunden gerundet. Die Volumenermittlung der Holzmengen erfolgt, den Angaben des Hackerunternehmers folgend, anhand der Schüttvolumina der erzeugten Hackschnitzel je Abteilung. Die Angabe der mittleren Rückeentfernung basiert auf einer Schätzung der Maschinenführer.

3.2.2 Teilprozess mobile Zerkleinerung

Vorangegangene Studien haben gezeigt, dass das Hacken auf der Rückegasse unter ökonomischen Gesichtspunkten schwierig ist: Dies ist zum einen der deutlich geringeren Leistung des Hackers auf der Rückegasse geschuldet (LECHNER ET AL., 2007), da hierfür kontinuierlich ausreichend gut ausgerichtete Holzmengen vorhanden sein müssen – was auf den Rückegassen zumeist nicht der Fall ist (JACKE, 2007C) – und zum anderen auf die sehr hohen Kosten dieser Maschinenkonfiguration pro Betriebsstunde zurückzuführen (vgl. JACKE, 2007B). Um eine bessere Vergleichbarkeit der Bereitstellungsketten untereinander zu gewährleisten, wurden daher die Zerkleinerung auf der Rückegasse und die Variante der Zerkleinerung an einem zentralen Platz im Wald in dieser Arbeit nicht berücksichtigt.

Für den Feldversuch kommt ein Jenz Hacker HEM 560Z (s. Abbildung 23; Tabelle 1.2-5 im Anhang) zum Einsatz. Dieser ist ein Trommelhacker, der aufgebaut auf ein zweiachsiges Fahrgestell als Anhängenhacker fungiert und somit mobil eingesetzt werden kann. Angetrieben wird das Gerät über die Zapfwelle des Zugfahrzeugs, wobei die Zapfwellenleistung mindestens 100 Kilowatt betragen muss¹⁵.

¹⁵ Durch entsprechende mechanische Antriebsverluste muss die DIN-Motorleistung um ca. 10 % höher liegen (JACKE, 2007B).

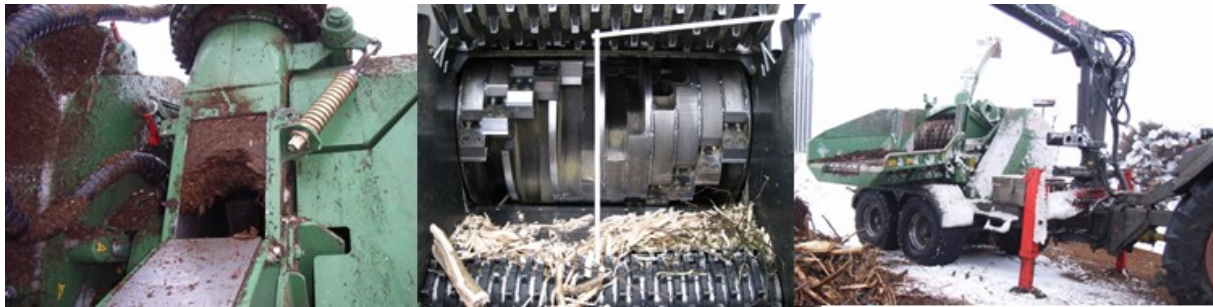


Abbildung 23: Versuchshacker HEM 560 Z von Jenz (rechts), Detailaufnahme der Hackertrommel (Mitte) und von einem nahezu verstopften Auswurfgebläse (links).

Im Versuchsaufbau ist der Schlepper Fendt Vario 936 das Antriebs- und Zugfahrzeug. Dieser verfügt über einen wassergekühlten Deutz-TCD-Sechszylinderdieselmotor mit einer Leistung von 243 und einer Zapfwellenleistung von 229,5 Kilowatt, jeweils bei Nenndrehzahl¹⁶. Wie bei allen zapfwellenbetriebenen Maschinen ist der Schleppermotor damit gleichzeitig Antriebsmotor für den Hacker, die Kabine des Schleppers wiederum bildet den Arbeitsplatz des Kranführers. Die Größe des Materialeinzugs bemisst sich mit 120 Zentimetern in der Breite und etwa 65 Zentimetern in der Höhe, bei einem Trommeldurchmesser von 82 Zentimetern, wodurch es möglich wird, Ganzbäume bis 56 Zentimeter Durchmesser einzuziehen. Laut Herstellerangaben (JENZ, 2006) eignet sich der Hacker somit für unhandliches Rohmaterial, wie Schlagabraum und Strauchschnitt, besonders gut. Die angegebene Durchsatzleistung der Maschine beläuft sich auf 120 Schüttraummeter je Stunde, der Materialeinzug erfolgt durch ein seitlich absenkbares Stahlförderband und eine darauf drückende Stachelwalze und ist ausschließlich von der in Fahrtrichtung rechten Seite des Hackers möglich. Der Hackschnitzelaustrag vollzieht sich über ein Gebläse. Um die Rüstzeiten zu minimieren, ist die Einzugswalze hydraulisch hochklappbar, so dass man, in Kombination mit einer Klappe in der Rotorhaube, relativ einfach einen Klingenwechsel vornehmen kann. Der Siebkorbwechsel gestaltet sich ebenfalls durch die hydraulisch zu öffnende Hackerrückwand als nutzerfreundlich.

Im Rahmen der Versuchsreihe bei der mobilen Hackung werden Selbstaufschriebe der Maschinenführer hinsichtlich der Gesamtarbeitszeit, der Reparatur- und Umsetzzeiten zur Auswertung herangezogen. Bei den Umsetzzeiten konnte aus organisatorischen Gründen nicht unterschieden werden, ob es sich um das Umsetzen innerhalb eines Auftrages von Polter zu Polter oder um die An- und Abfahrten des Hackergespanns handelt.

Tabelle 8: Untersuchte Maschinen zur mobilen Hackung. Anzahl der untersuchten Tage, Betriebsstunden der Hacker und der produzierten Hackschnitzelmengen.

Bezeichnung	Transportvariante	Tage [N]	BS [h]	Hackgut [SRm]
JENZ HEM 561Z	Container-Lkw	13	118	2.114
JENZ HEM 560Z	Schlepper 2 Anhänger	3	30	474
	Schlepper Abrollwagen	6	56	1.661

¹⁶ Nenndrehzahl: 2200 Umdrehungen pro Minute. Maximale Motorleistung 265 kW (Zapfwellenleistung: 256,5 kW) bei 1800 Umdrehungen.

Darüber hinaus liegen Angaben zu den erzeugten Hackschnitzelvolumina und den Betriebsstunden der Maschine vor. Erstgenanntes wurde lediglich von den Fahrern der Transportfahrzeuge durch Schätzung des Füllstands der Transportbehälter ermittelt, um den Ablaufprozess nicht zu stören. Eine Rückversicherung erfolgte beim Abnehmer, wo man den Füllstand ebenfalls in Augenschein nahm. Bei Abweichungen musste zur Ermittlung der zu fakturierenden Holzmenge eine Einigung zwischen den beiden Schätzungen erzielt werden; diese gilt im Rahmen der Datenauswertung als Grundlage.

3.2.3 Teilprozess Ferntransport von Hackschnitzeln

Im Rahmen der Untersuchungen der mobilen Waldrestholzerkleinerung bestand die Gelegenheit, unterschiedliche professionelle Transportmöglichkeiten zu begleiten. Die Tabelle 9 gibt Aufschluss über die drei untersuchten Varianten.

Tabelle 9: Übersicht der Transportvarianten. Anzahl der untersuchten Fälle, gesamtes Transportvolumen und mittlere einfache Transportentfernung.

	Fälle [N]	Transport- volumen [SRm]	Mittlere einfache Trans- portentfernung [km]
Gliederzug-Lkw mit Abrollcontainer	30	2.113	27
Landw. Schlepper 2 Anhänger	8	316	67
Landw. Schlepper Abrollwagen	6	295	28

Die Containerfahrzeuge setzen sich aus einem Gliederzug-Lkw mit Hakenliftkran, analog den Aufnahmen zum Bündeltransport durch Container-Lkw, zusammen (vgl. Kapitel 3.3.3). Auf dem dreiachsigen Zugfahrzeug und dem zweiachsigen Anhänger befindet sich jeweils ein Abrollcontainer mit circa 38 Kubikmetern Fassungsvermögen.



Abbildung 24: Tridem Rollbandwagen (links, Krampe, 2013; vgl. Abbildung 17) und Dreiseitenkipper (rechts, Kröger, 2013)

Die beiden anderen vorliegenden Transportalternativen werden von landwirtschaftlichen Standardschleppern angetrieben, wobei eine Variante mit zwei kippbaren Anhängern mit Drehschemellenkung versehen ist. Letztere können sowohl seitlich als auch nach hinten

abladen und weisen dabei ein Fassungsvermögen von jeweils etwa 20 Kubikmetern auf (s. Abbildung 24, rechts). Die zweite betrachtete Option verfügt über einen Rollbandwagen mit zwei Lenkachsen (hinten und vorne) und einer Starrachse (Mitte) in Starrdeichselbauweise (Tridem). Das beförderbare Volumen der Wanne ergibt circa 52 Kubikmeter. Die Entladung erfolgt mittels eines Abrollsystems nach hinten (s. Abbildung 24, links).

Um aussagekräftige Ergebnisse zu erzielen, erfolgte eine Zeitmessung der einzelnen Ablaufabschnitte analog zu den Erhebungen beim Bündeltransport (s. Kapitel 3.3.3). Das heißt, ein Mitfahrer begleitete die Beförderungen mit einer Stoppuhr und notierte nach Beendigung eines Arbeitsablaufabschnittes die Zwischenzeiten. Die Transporte werden auch in diesem Fall in Zyklen und diese wiederum in die unterschiedlichen Arbeitsablaufabschnitte untergliedert. Auch hier ist die Abfolge eine vollständige Tour, begonnen mit dem Verlassen des Geländes beim Abnehmer. Eine anfängliche Tour, bei der der Lkw beispielsweise beladen vom Standort der Übernachtung zum Abnehmer lenkt, wird nicht aufgenommen. Gleiches gilt für Fahrten, bei denen das Transportfahrzeug unbeladen vom Ort der Übernachtung direkt zum Einsatzort fuhr. Da gleichzeitig mehrere Transportfahrzeuge des gleichen Typs (s. Tabelle 9) im Einsatz waren, mussten entsprechend auch die gleiche Anzahl an Zeitnehmern die anfallenden Daten erfassen.

Tabelle 10 verbildlicht die untersuchten Ablaufabschnitte: Grundsätzlich kommen die genannten Schritte bei allen drei Transportvarianten vor, jedoch in unterschiedlicher Reihenfolge und Häufigkeit. Bei der Beladung der Fahrzeuge mit zwei Anhängern werden zwangsläufig zwei Beladevorgänge durchgeführt, unterbrochen von Rangierzeiten sowie gegebenenfalls Wartezeiten.

Tabelle 10: Definition der einzelnen Ablaufabschnitte beim Transport von Hackgut.

Ablaufabschnitt	Nutzung Lkw	Beginn	Ende
<i>Fahrt zum Einsatzort</i>	Fahren	Verlassen Gelände Abnehmer	Beginn nächster Abschnitt
<i>Rangieren</i>	Fahren, Container absetzen, Tausch	Erreichen Einsatzort, Rangierplatz (Cont.)	Beginn nächster Abschnitt
<i>Warten</i>	Stillstand	Bereitschaft zum Beladen hergestellt	Beginn nächster Abschnitt
<i>Laden</i>	Stillstand; Container manip.	Befüllung durch Hacker	Beginn nächster Abschnitt
<i>Rangieren (Container)</i>	Fahren, Container absetzen, Tausch	In Bewegung setzen am Hacker	Beginn nächster Abschnitt
<i>Fahrt zum Abnehmer</i>	Fahren	In Bewegung setzen b. Hacker / Rangierplatz (Container)	Beginn nächster Abschnitt
<i>Rangieren (Entladen)</i>	Stillstand, Fahren, Abkippen	Erreichen Gelände Abnehmer	Verlassen Gelände

Die häufig notwendigen Rückwärtsfahrten, die die richtige Position der Maschinen zueinander herstellen, zählen gleichwohl dem Tausch der Container, dem An- und Abkoppeln von Anhängern und allen notwendigen Tätigkeiten beim Entladen zum Ablaufabschnitt Rangieren.

3.3 Zerkleinerung am Werk

3.3.1 Teilprozess Bündelung

Im Rahmen der vorliegenden Arbeit wurde der Einsatz von vier Restholzbündlern des Typs Pinox 828 mit dem Bündelaggregat Pinox 330 (s. Abbildung 25 u. Tabelle 11) von November 2007 bis Januar 2009 begleitet. Ein Vergleich zwischen verschiedenen Herstellern kann somit nicht erfolgen; die Maschinen variierten lediglich hinsichtlich ihres Alters, des Grades der Abnutzung sowie ihres Entwicklungsstandes.



Abbildung 25: Multimaschine Pinox 828 (rechts im Bild) und das abnehmbare Bündelaggregat Pinox 330 (links).

Die Kombimaschine Pinox 828 verfügt über eine Drehkabine mit einem zehn Meter langen Kran. Ein Gassenabstand von 20 Metern, wie er in der hochmechanisierten Holzernte üblich ist, kann entsprechend eingehalten werden und eine flächige Befahrung bei der Aufnahme von Schlagabraum ist nicht notwendig. Die Kabine gewährleistet zudem ein ergonomisch günstiges Operieren für den Fahrer, da es diesem möglich wird, immer innerhalb seines Blickfeldes – so auch beim Aufnehmen des Schlagabraums vor der Maschine – zu arbeiten.

Tabelle 11: Untersuchte Restholzbündler und wichtige Kennwerte.

Nr.	Bezeichnung	Baujahr	Bündelaggregat
1	Pinox 828 - 1017	2004	1. Generation
2	Pinox 828 - 1019	2005	2. Generation
3	Pinox 828 - 1021	2006	2. Generation
4	Pinox 828 - 1024	2007	3. Generation

Seit der Entwicklung der Bündelaggregate hat es einige Weiterentwicklungen der Produkte gegeben: So wurde die Aggregatsteuerung komplett, analog zu einem Kurzholzaggregat, automatisiert. Als Hardware fungiert in der neuesten Generation ein DASA-4-Computer, anstelle des in Generation 1 und 2 verwendeten IQuan-Steuerungssystems. Zusätzlich verfügen die aktuellen Aggregate über eine gesteigerte Leistung der Ölmotoren an den Bändern und Walzen zum Materialeinzug. Darüber hinaus wurde die Längenmessung verbessert, indem man ein starres Längenmessrad innerhalb der Bündelheit anstelle eines beweglichen Messrades, welches sich außerhalb befand, installierte. Auf diese Weise soll das Überfahren der Bündel vermieden werden.

Das Bündelaggregat kann abgenommen werden, wodurch Rückearbeiten insbesondere bei kleineren Flächen durch die Maschine selbst durchgeführt werden können. Mittels des Anbaus von Zusatzaggregaten wird es ebenfalls denkbar, das Einschneiden, Entasten, Poltern von Stammholz sowie die Bündlerbeschickung (Kombiharvesterkopf) oder das Abkniefen, Ablängen und die Bündlerbeschickung (Fäller-Sammler-Aggregat) zu übernehmen. Detailliertere Informationen zu der Basismaschine sind bei Brokmeier (2007) zu finden.

Im Rahmen der hiebsweisen Leistungserfassung wurden die wesentlichen Parameter bei der Bereitstellung von Waldrestholz mit Bündelaggregaten auf vorgefertigten Erfassungsbögen dokumentiert. Diese Vorgehensweise entspricht in ihrem methodischen Muster einem standardisierten Fragebogen, der im Anschluss an eine durchgeführte Maßnahme vom zuständigen Revierleiter und dem Maschinenführer auszufüllen war. Dieses zieht einen deutlich geringeren Arbeitsaufwand nach sich als beispielsweise die tageweise Erfassung. Eine Tatsache, die gerade hinsichtlich der Bereitschaft der Zielpersonen, die Erfassungsbögen ordnungsgemäß auszufüllen, nicht zu vernachlässigen ist (vgl. PAUSCH, 2002). Im Vergleich zu täglichen Erhebungen ist die geringere Detailauflösung nachteilig.

In den Erfassungsbögen (s. Abbildung 2.1-1 im Anhang) werden verschiedene Informationen dokumentiert:

- Charakteristik des Waldbestandes
- Maschinendaten
- Leistungsdaten

Insgesamt werden bei 33 Flächen mit einer Gesamtgröße von 118,5 Hektar Informationen über die in Tabelle 12 dargestellten Einflussfaktoren berücksichtigt. Bei sechs weiteren Einsätzen, außerhalb der Schlagabraumaufbereitung von Kyrillflächen, konnten lediglich die Leistungsdaten in die Untersuchung einfließen.

Tabelle 12: Im Rahmen der Hiebsprotokolle erfasste Variablen.

Bestandeskennwerte	Hiebsparameter
Hauptbaumart [Fichte, Laubholz]	Rundholzanfall je Hektar [Efm/ha]
Holzvorrat Ausgangsbestand [Vfm/ha]	Zopfdurchmesser [cm]
Hangneigung [Grad]	Ernteverfahren Rundholz
Größe der Untersuchungsfläche [ha]	Energieholzanfall je Hektar [St./ha]

Bei den Geländeparametern wird neben der Flächenbezeichnung die Geländeneigung abgefragt. Hierbei erfolgt eine Einteilung anhand der maximalen durchschnittlichen Geländeneigung, wobei der Hieb die Bezugsebene darstellt. Die Differenzierung richtet sich an den Neigungsstufen aus (s. Tabelle 13).

Tabelle 13: Einteilung der Geländeneigung auf den Hiebsflächen in Neigungsbereichen.

Stufe	Geländeneigung [Grad]	
	von	bis
1	0	10
2	0	15
3	0	20
4	0	Max.

Hinsichtlich der Hiebsparameter wird der Mindestzopfdurchmesser erhoben. Die Aushaltung der Stammholzsortimente gibt das Maß vor, dessen Angabe in Zentimetern erfolgt. Bei der Auswertung werden die Durchmesser in Klassen eingeteilt, da der Zopfdurchmesser als Mindestmaß angegeben wird und nicht den tatsächlichen Werten entsprechen muss. Auf diese Weise ist es möglich, dass zahlreiche Baumkronen schon bei größeren Stammdurchmessern als dem vorgegebenem Mindestzopf abgetrennt werden, da beispielsweise bereits die Maximallänge der Stämme erreicht ist. Darüber hinaus werden gewisse Mindestzopfdurchmesser erfahrungsgemäß häufiger angewendet (7; 8; 12; 15; 20 cm), was bereits zu einer Vorklassifizierung führt.

Die Maschinenführer machen im Rahmen der Protokollierung Angaben über die Anzahl der produzierten Bündel, die eingesetzten Gesamt- beziehungsweise Betriebsstunden der Maschinen und ob das zu bündelnde Material in irgendeiner Form vorkonzentriert war. Dabei soll eine Kategorisierung nach der Erntemethode vorgenommen werden (s. Tabelle 14). Differenziert wird einerseits nach motormanueller Aufarbeitung und Einschlag durch Harvester, andererseits ist von Interesse, ob die Wipfelstücke beispielsweise aus Gründen des Forstschutzes weiter eingekürzt oder lang belassen wurden. Bei der maschinellen Aufarbeitung kann der Schlagabraum durch Ablegen auf Raubergen entlang der Gassen vorkonzentriert werden – eine Tatsache, die ebenfalls abgefragt wird.

Tabelle 14: Einteilung der Erntemethode auf den Hiebsflächen in Gruppen bzw. Codierung der Dummy-Variablen für die Regressionsanalyse.

Gruppe/ Bez.	Stammholz Aufarbeitung	Wipfel eingekürzt	Restholz vor- konzentriert
A	Harvester	Ja	Ja
B	Harvester	Nein	Ja
C	Harvester	Ja	Nein
D	Harvester	Nein	Nein
E	Motormanuell	Ja	Nein
F	Motormanuell	Nein	Nein

Die Bündelung erfolgte vorwiegend auf Kahlflächen, die infolge des Windwurfs Kyrill (tlw. Emma) entstanden sind und zuvor vollständig mit Fichte bestockt waren. Anschließend arbeitete man die Bäume auf, um das Holz ernten zu können. Dieser Arbeitsschritt ging vollmechanisiert mit Harvestern und Rückezügen oder hochmechanisiert (motormanuelle Aufarbeitung / tlw. Unterstützung durch einen Bagger; maschinelle Rückung) vonstatten. Das Ast- und Kronenmaterial verblieb auf der Fläche und sollte zur weiteren Verwendung bereitgestellt werden.

Die Flächenvoraussetzungen variieren in diesem Fall einerseits hinsichtlich der Art der Aufarbeitung, andererseits bezüglich der unterschiedlichen Behandlung des Restholzes bei der Holzaufarbeitung. Vielfach wurde eine weitere Verwertung des Ast- und Kronenmaterials nicht berücksichtigt, was dazu führt, dass das Material auf der Fläche verteilt oder konzentriert in der Fahrgasse der Maschinen zu finden ist. Vereinzelt konnte auf Flächen zurückgegriffen werden, bei denen die Holzaufarbeitung unter Berücksichtigung der weiteren Verwendung des Restholzes erfolgte. In diesen Momenten wurden Wipfelstücke nicht weiter eingeschnitten, das Material neben der Fahrgasse vorkonzentriert und ein größerer Anteil des Holzes als sonst üblich an der Baumkrone belassen. Letzteres geschah, um die Qualität des Restholzes zu verbessern.

3.3.2 Teilprozess Bündelrückung

Die Rückung der Bündel im Rahmen der Feldversuche erfolgte durch unterschiedliche Standardtragschlepper oder durch Pinox-828-Kombimaschinen mit abgesetztem Bündelaggregat.



Abbildung 26: Versuchsfahrzeuge für die Bündelrückung. Der Forwarder P818 (links) sowie die Kombimaschine P828 (rechts) von Pinox.

Die Kombimaschine Pinox 828 (s. Abbildung 26; rechts) kann als Trägerfahrzeug für das Bündelaggregat Pinox 330 fungieren (vgl. Kapitel 3.3.1), wie im vorliegenden Fall als Tragschlepper eingesetzt werden oder in Kombination mit einem anbaubaren Harvesterkopf als Maschine zur Holzernte eingesetzt werden. Dabei kann man die eingeschnittenen Sortimente unmittelbar beim Trennschnitt auf die um 270 Grad schwenk- und um ± 12 Grad kippbare Ladefläche fallen lassen. Hierfür verbaute man unterhalb der Ladefläche einen Drehkranz und zwei Hydraulikzylinder, durch die der Schwerpunkt der Ladefläche höher liegt und sich das Ladevolumen (Laderaumquerschnitt $3,8 \text{ m}^2$, Brokmeier, 2007) geringer darstellt als bei üblichen Tragschleppern.

Zur Ermittlung der Produktivität beim Rücken von Bündeln werden ebenfalls Selbstaufschriebe herangezogen, wobei sich die Erfassungsbögen in diesem Zusammenhang auf die Abfrage der Gesamtarbeitszeit, der Maschinenbetriebsstunden, der Anzahl der gerückten Bündel und der geschätzten Rückeentfernung beschränken. Die Eintragungen erfolgen zudem tagesweise.

Tabelle 15: Einteilung der mittleren Rückeentfernung in Klassen zur Abfrage im Erfassungsbogen.

Klasse	1	2	3	4	5
Rückeentfernung [m]	< 100	101-200	201-300	301-400	>400

Die Rückeentfernung, die auf einer Schätzung der Maschinenführer basiert, wurde in verschiedene Klassen unterteilt, wobei sich die Kategorisierung an in der Praxis erprobten Entfernungen orientierte (s. Tabelle 15).

3.3.3 Teilprozess Ferntransport der Bündel

Holztransportfahrzeuge unterscheiden sich im Wesentlichen hinsichtlich der Fahrzeugkonfigurationen und der Ladekapazitäten. Es existieren Zugfahrzeuge mit Anhänger als Gliederzug zum Kurzholztransport oder Kombisysteme als Sattelaufleger zur Beförderung von Lang- und Kurzholz (vgl. STRUNK, 2003). Im Rahmen der Zeitstudie zum Bündeltransport werden insgesamt vier verschiedene Transportfahrzeuge mit Rungenaufbau eingesetzt (s. Abbildung 27).

Tabelle 16: Überblick über die eingesetzten Transportvarianten.

Art	Bez.	Zugmaschine	Anhänger
Kurzholzzug	K1	3 – Achs	2 – Achs
	K2	3 – Achs	2 – Achs
	K3	2 – Achs	3 – Achs
Kombisystem	K4	3 – Achs	2 – Achs-Aufleger

Tabelle 16 liefert einen Überblick der angewandten Transportoptionen. Um eine Zuordnung im Ergebnisteil dieser Studie zu erleichtern, vergibt die obenstehende Darstellung zudem Kürzel für die unterschiedlichen Varianten.

Die Kurzholzzüge unterscheiden sich in ihrer Aufbauweise: Während K1 einen Schemelaufbau aufweist und in alle Richtung offen ist, verfügt K2 über eine geschlossene Bodenplatte (Plattform- / Plateaufbau) sowie geschlossene Stirngitter am Zugfahrzeug und am Anhänger. K3 besitzt darüber hinaus noch circa 120 Zentimeter hohe Seitenplatten. Der Kombizug K4 ist als einziges Fahrzeug in der Studie in Aufliegerbauweise (s. Abbildung 27) ausgeführt.



Abbildung 27: Überblick über eingesetzte Holztransportvarianten. Kurzholzzug mit offener (K1), geschlossener (K2) Bodenplatte und mit Seitenwänden (K3) sowie Kombizug (K4).

Neben den Zeitstudien beim Bündeltransport durch Rundholz-Lkw wird ebenfalls der Bündeltransport mit Container-Lkw betrachtet. Bei den Containerfahrzeugen handelt es sich um Standardfahrzeuge mit Hakenliftsystem; als Container dienen 38 Kubikmeter fassende Mulden mit jeweils einer Länge von 700, einer Höhe von 225 und einer Breite von 240 Zentimetern (Innenmessung). Die Beladung der Container muss durch Fremdfahrzeuge erfolgen: So werden bei den Transportversuchen die Container entweder durch einen Dreiachs-Lkw mit Wechselfahrgestell und am Heck aufgebauten Holzladekran Loglift F 165 Z 78 oder durch einen Forwarder bestückt (s. Tabelle 19; Abbildung 28, rechts). Um eine Entladung durchzuführen, müssen die Containerfahrzeuge abgekippt werden (s. Abbildung 28, links).



Abbildung 28: Containerbeladung (rechts) und Entladung durch Kippen (links) beim Bündeltransport mit Containerfahrzeugen.

Um die Produktivität beim Bündeltransport zu erfassen und einen Vergleich mit der Beförderung von Kurzholz gewährleisten zu können, begleitete man einige Lkw-Transporte mit Zeitstudien. Diese wurden grundsätzlich in Anlehnung an die Empfehlungen des REFA-

Fachausschusses zur Durchführung von Zeitstudien im Fortschrittszeitverfahren (REFA, 1998) durchgeführt. Von besonderem Interesse sind in diesem Kontext die Zeitangaben für das Laden der Bündel, da bereits ausreichend viele Daten hinsichtlich der übrigen Zeiten vorliegen (bspw. BROKMEIER, 2013A; FRIES, 2009; LANGE ET AL., 2009; BAUMANN, 2008; BODELSCHWINGH, 2005, 2004, 2001; FRIEDL ET AL., 2004 u. a.). Erfasst werden lediglich die ablaufspezifischen Arbeitszeiten, die für die Erfüllung des Arbeitsauftrages anfallen und die auf ein bestimmtes Projekt (eine vollständige Tour) zu beziehen sind. Die Bezugsgrößen sind die Stückzahl der transportierten Bündel sowie die zurückgelegte Strecke in Kilometern.

Tabelle 17: Definition der einzelnen Ablaufabschnitte beim Bündeltransport mit Lkw.

Ablaufabschnitt	Beginn	Nutzung Lkw	Ende
<i>Fahrt zum Polter</i>	Verlassen Gelände beim Abnehmer	Fahren	Beginn nächster Abschnitt
<i>Laden</i>	Stillstand am Polter	Stillstand; Kranarbeit	Beginn nächster Abschnitt
<i>Fahrt zum 2. Polter (Sammeltour)</i>	In Bewegung setzen am Polter	Fahren	Beginn nächster Abschnitt
<i>Fahrt zum Abnehmer</i>	In Bewegung setzen am letzten Polter	Fahren	Beginn nächster Abschnitt
<i>Entladen</i>	Erreichen Gelände beim Abnehmer	Stillstand, Fahren, ggf. Kranarbeit	Verlassen Gelände

Zur Zeiterfassung wird der Transport in Zyklen und diese wiederum in Arbeitsablaufschritte (s. Tabelle 17) unterteilt. Ein Zyklus umfasst eine Tour, die einen in regelmäßigen Abständen wiederkehrenden Transportvorgang, bestehend aus Fahrt zum Polter, Laden, Fahrt zum Abnehmer und Entladen, darstellt (vgl. FRIES, 2009). Diese Unternehmung beginnt in der vorliegenden Untersuchung beim Abnehmer, führt über die Fahrt zum Lagerplatz im Wald, das Laden mittels eines fahrzeugeigenen Krans sowie das anschließende Sichern der Güter und endet mit dem Transport zum Abnehmer. Hier findet die Entnahme durch Fremd- oder Selbstentladung statt und es beginnt zugleich eine neue Tour. Zur vollständigen Auslastung kann es notwendig sein, dass der Lkw an mehreren Stellen Ware aufnehmen muss, also sogenannte Sammeltouren durchführt. Diese unterscheiden sich von den Ganztouren dadurch, dass nach dem Laden am ersten Polter eine Fahrt und weitere Ladezeit folgen, ehe der Lkw vollständig ausgelastet die Fahrt zum Abnehmer antritt. Mit wenigen Ausnahmen wurden im Rahmen der Aufnahmen ausschließlich Ganztouren gefahren.

Da keine technischen Hilfsmittel¹⁷ für eine automatische Zeitaufnahme zur Verfügung standen, musste eine Person als Beifahrer die Touren begleiten. Die die Daten liefernden Aufnahmen erfolgten mit Hilfe einer digitalen Stoppuhr, die zum Beginn eines Zyklus betätigt wurde. Des Weiteren stoppte man jeweils zum Ende eines Ablaufabschnittes (Rundenzeit) und übertrug die erfassten Daten sekundengenau in einen entsprechenden Bogen (Fort-

¹⁷ PDA mit Datenaufzeichnungssoftware (vgl. KANZIAN ET AL., 2006A) oder GPS Logger (vgl. FRIES, 2009).

schrittszeitstudie). Die vermerkten Werte wurden dann manuell in ein Tabellenkalkulationsprogramm (MS Excel) transferiert und in Dezimalmaß umgerechnet.

Tabelle 18: Definition des alternativen Ablaufabschnittes Wiegen beim Bündeltransport mit Lkw.

Ablaufabschnitt	Nutzung Lkw	Beginn	Ende
Fahrt zum Wiegen	Fahren	In Bewegung setzen am letzten Polter	Beginn nächster Abschnitt
Wiegen	Stillstand, Fahren	Erreichen Gelände Genossenschaft	Verlassen Gelände

Neben der Auswertung der Transportvarianten ist auch eine Untersuchung der Bündeleigenschaften Bestandteil dieser Arbeit. Um die Masse eines Bündels, aber ebenfalls die Ausnutzung der maximal zulässigen Gesamtmasse der Transportfahrzeuge zu erfassen, stützt sich die Studie auf die bei den Touren vorgenommenen Wiegungen. Da auf dem Betriebsgelände, auf dem die Bündel abgeladen werden, keine Fahrzeugwaage verfügbar ist, musste auf die Brückenwaage einer Getreidegenossenschaft zurückgegriffen werden. Meist lag die Genossenschaft direkt auf der Route oder es war nur ein geringfügiger Umweg zu fahren. Die Masse der beladenen Kurzholz-Lkw sowie der für das Wiegen benötigte Zeitbedarf konnten bei 25 Fahrten festgehalten werden. Die Strecke, die gegebenenfalls als Umweg in Kauf genommen werden musste, wurde nicht protokolliert und fließt dementsprechend in die Gesamtstrecke mit ein. Für den Fall, dass das Gewicht der Lkw bemessen wurde, ergänzte man die Zeitmessung um die entsprechenden Ablaufabschnitte (s. Tabelle 18). Dabei folgt dem Ablaufabschnitt ‚Wiegen‘ grundsätzlich die Fahrt zum Abnehmer, da dieser Vorgang an das Ende, direkt im Anschluss an den letzten Ladevorgang, gesetzt ist.

Tabelle 19: Übersicht über die erhobenen Zeiten, das verwendete Beladefahrzeug und die Anzahl der transportierten Bündel (N) beim Transport durch Containerfahrzeuge.

Ort	Beladung	N (St.)	Erhobene Zeiten
1	Rundholz-Lkw	11 (509)	GAZ; Fahrzeit; Beladen / Rangieren; AZ
2	Forwarder	5 (264)	GAZ; Fahrzeit; Beladen / Rangieren; AZ

Beim Bündeltransport mit Containerfahrzeugen liegen, entgegen den detaillierten Zeitaufnahmen beim Transport mit Rundholz-Lkw, Selbstaufschriebe der Maschinenführer vor. Diese enthalten Zeitdaten zu unterschiedlichen Arbeitsablaufabschnitten sowie Produktionsdaten. Letztere geben eine Aussage zur Anzahl der transportierten Bündel pro Fuhre, Erstere halten die Uhrzeit des Beginns eines Ablaufabschnittes fest. Um die Aufzeichnung zu vereinfachen, erfolgte der Aufschrieb jeweils zu Beginn der Leerfahrt, der Ankunft an der Ladestelle und zum Anfang der Lastfahrt sowie zur Ankunft an der Entladestelle. Darüber hinaus wurden Arbeitsbeginn und -ende sowie die Zeiten für Pausen (AZ) festgehalten. Die Differenz von Arbeitsende und -anfang ergibt die Gesamtarbeitszeit (GAZ). Die GAZ und AZ sind nicht mit den aus Zeitstudien bekannten Definitionen gleichzusetzen (vgl. REFA, 2004), da es sich hier

um Selbstaufschriebe handelt, bei denen die Einteilungen weniger scharf abgegrenzt und manipulierbar sind. Zur Vereinfachung sollen die Abkürzungen dennoch im Folgenden verwendet werden. Die konkret erhobenen Zeitinformationen sind der Tabelle 19 zu entnehmen. Die Zeit für das Beladen der Container berechnet sich aus den Betriebsstunden der Ladefahrzeuge; insgesamt fand diese Transportvariante bei zwei Einsatzorten Anwendung.

3.3.4 Teilprozess zentrale Holzaufbereitung

Der Versuchsaufbau bei der zentralen Zerkleinerung sieht vor, möglichst die Produktionsbedingungen einer stationären Anlage in einem Feldversuch zu simulieren. Dabei wurden innerhalb von fünf Tagen mit den unterschiedlichen Zerkleinerern insgesamt circa 1934 Kubikmeter Hackgut, den Einsatz der Siebanlage inkludiert, beziehungsweise 1522 Kubikmeter ohne Siebanlage erzeugt. Im Rahmen der Untersuchung können drei verschiedene Zerkleinerungsmaschinen und eine Siebanlage vorgestellt werden. Aufschluss über die untersuchten Maschinen liefert die nachstehende Tabelle 20. Darüber hinaus fanden umfangreiche Untersuchungen des zerkleinerten Holzes statt (s. Abschnitt 3.4).

Tabelle 20: Bezeichnung der im Versuch eingesetzten Zerkleinerungsmaschinen, Name des Herstellers, Einteilung in Kategorie und Anzahl der zerkleinerten Bündel.

Bezeichnung	Hersteller	Art	N
HEM 560 Z	Jenz	Trommelhacker	463
VB 750D	Hammel	Zweiwellen-Zerspaner	376
Crambo 5000	Komptech	Zweiwellen-Zerspaner	246
Crambo 5000 mit Siebanlage Multistar M3 von Komptech			377

Beim Jenz Hacker handelt es sich um eine mobile Maschine, deren genauere Beschreibung in Kapitel 3.2.2 vorgenommen wird. Im Feldversuch zur Untersuchung der Bereitstellungs-kette „Zerkleinerung im Werk“ soll der stationäre Einsatz eines Trommelhackers durch die Verwendung dieser Maschine simuliert werden, da keine stationäre Anlage zur Verfügung stand.

Der **Hammel VB 750D** (s. Abbildung 29; Tabelle 2.3-23 im Anhang) ist ein sogenannter Vorbrecher, der sich in vielen Eigenschaften kaum vom nachfolgend beschriebenen Crambo 5000 unterscheidet.

Zwei gegeneinander laufende Walzen, bestückt mit Spezialwerkzeugen, sorgen für den Einzug und die Zerkleinerung des Holzes. Bei diesem Vorgang greifen die mit aggressiven Reißhaken und Klingen bestückten Werkzeuge ineinander, reißen und brechen das eingezogene Material (s. Abbildung 30). Je nach gewählter Werkzeugkonfiguration sind den Herstellerangaben zufolge Endkorngrößen zwischen 12 und 50 Zentimeter erzeugbar. Ein Aufwickeln von Drähten, Schnüren und langfaserigen Stoffen soll ein besonderer Wickelschutz weitestgehend ausschließen. Die Wellen werden hydraulisch angetrieben und gehen bei Überlastung in den reversierenden Betrieb, wobei diese rückwärts drehen, das Material

auseinanderwerfen, sich reinigen und schließlich erneut auf Vorwärtslauf schalten und damit den normalen Brechvorgang wieder aufnehmen.



Abbildung 29: Versuchszerkleinerer VB 750 von Hammel.

Im stationären Betrieb werden Elektromotoren mit 260 Kilowatt elektrischer Leistung, bei der mobilen Version ein entsprechender Dieselmotor, eingesetzt. Die Maschine verfügt über einen muldenförmig ausgebildeten Kipptrichter mit einem Fassungsvermögen von circa sieben Kubikmetern, der automatisch oder manuell mit einem Anstellwinkel von etwa 45 Grad angehoben werden kann (s. Abbildung 30). Auf diese Weise ist es möglich, den Einzugsbereich mit mehr Material zu bevorraten. Der Materialaustrag erfolgt anschließend über ein Förderband. Der Vorbrecher ist für einen stationären Betrieb ausgelegt, kann aber auf kurzer Distanz durch eine absenkbare Achse und eine Zugöse bewegt werden.



Abbildung 30: Detailaufnahme der Walzen (links) und des kippbaren Fülltrichters (rechts).

Beim **Komptech Crambo 5000** (s. Abbildung 31; Tabelle 2.4-25 im Anhang) handelt es sich um einen Zerkleinerer mit zwei langsam, gegenläufig drehenden Wellen, die in Schneckenform mit unterschiedlichen Werkzeugen bestückt werden können. Die Wellen, auf denen sich 134 Schneidelemente befinden, sind 282 Zentimeter lang und haben einen Durchmesser von 61 Zentimetern. Die Schneidwerkzeuge selbst weisen eine große Resistenz gegen Beschädigung durch Störstoffe auf. Die Wellen werden hydraulisch angetrieben und drehen sich mit einer maximalen Geschwindigkeit von 32 Umdrehungen pro Minute. Dabei ziehen sie das

Material ohne weitere Zuführung aktiv ein. Der hydraulische Walzenantrieb sichert durch lastabhängige Drehzahlregulierung (Konstantleistungsregelung) eine gute Ausnutzung der Motorleistung. Bei Überlast durch schwer zu zerkleinerndes Material oder eine zu große Menge an Objekten im Einzug verhindert eine Lastschuttsicherung die Zerstörung von Maschinenteilen.



Abbildung 31: Versuchszerkleinerer Crambo 5000 von Komptech.

Die Antriebsleistung bemisst sich mit zweimal 160 Kilowatt bei Verwendung eines Elektroantriebs. Erfolgt dieser jedoch durch einen Dieselmotor, wird eine Nennleistung von 328 Kilowatt angegeben. Antrieb und Zerkleinerungseinheit stellen zwei unterschiedliche Aggregate dar, die mit Hydraulikschläuchen und einem Steuerungskabel verbunden sind. Die vollständige Kapselung des Motorraums senkt die Lärmemissionen und schützt den Motorraum vor zu viel Staub.



Abbildung 32: Detailansicht der Walzen (links) und des auswechselbaren Siebkorbs (rechts) des Crambos.

Die Materialeingabe erfolgt bei diesem Gerät ebenfalls von oben. Die Ladehöhe beträgt circa 290 Zentimeter, die Ladeöffnung mit den Abmaßen 280 mal 330 Zentimeter kann durch hydraulisch verstellbare Klappen um einige Zentimeter vergrößert werden. Als Besonderheit gegenüber anderen Wellenzerkleinerern verfügt dieses Modell über unterschiedliche Siebkörbe, durch die die Größe des erzeugten Materials beeinflusst werden kann. Dieses verbleibt solange im Zerkleinerungsraum, bis die Lochgröße des Siebs erreicht ist und das

Material mit Hilfe der Werkzeuge durch das Sieb gedrückt werden kann. Das Endprodukt zeichnet sich durch eine stückige Zerkleinerung mit rauen und faserigen Kanten der Holzstücke aus. Mittels der Siebkörbe soll gewährleistet sein, dass auch Hackgut der üblichen Korngröße für kleinere Anlagen erzeugt werden kann, ohne dass nennenswerte Mengen an Ausreißern auftreten. Der Materialaustrag erfolgt über ein Förderband mit Auswurfhöhen bis zu 410 Zentimetern.

Der Crambo 5000 wird im Feldversuch teilweise gemeinsam mit einem **Komptech Sternsieb Multistar M3** betrieben, wobei die beiden Maschinen in Reihe aufgestellt werden (s. Abbildung 33; Tabelle 2.4-27 im Anhang), so dass das zerkleinerte Material vom Crambo direkt in den Bunker der Siebanlage gelangt. Die Besonderheit dieser Konstellation besteht darin, dass mit einer Siebanlage drei Fraktionen unterschiedlicher Größe separiert werden können, da sich diese aus zwei getrennten Siebdecks speist. Das obere ist mit groben Sternen ausgestattet und siebt das Grobgut ab. Der Durchgang fällt auf das untere Siebdeck (s. Abbildung 42, links), auf dem feinere Sterne installiert sind. Hier wird die Mittelfraktion separiert. Das Unterkorn gelangt durch die Sterne und wird, so wie die beiden übrigen Fraktionen, mit einem Förderband ausgetragen. Dabei kann die Siebanlage flexibel eingesetzt werden, indem die erzeugte Körnung kurzfristig über das Bedienfeld der Maschine verändert wird.



Abbildung 33: Versuchssiebanlage Multistar M3 von Komptech.

Der Antrieb erfolgt durch Elektromotoren, wobei in der mobilen Variante der notwendige Strom von einem Dieselmotor mit Generator erzeugt wird. Die erforderliche Anschlussleistung beträgt 46 Kilowatt. Die Durchsatzleistung wird vom Hersteller mit 120 Kubikmetern je Stunde angegeben.

Bei den Aufnahmen zur zentralen Zerkleinerung steht die Ermittlung der Produktivität im Vordergrund, weshalb die Studie auf die Einteilung in detaillierte Arbeitsablaufabschnitte verzichtet. Gemessen werden nach dem Einzelzeitverfahren der Zeitverbrauch der reinen Arbeitszeit und die Gesamtarbeitszeit pro Zyklus. Letzterer umfasst die Zerkleinerung beziehungsweise Befüllung eines Transportcontainers und beginnt, wenn das erste Material dem Einzugstrichter der Zerkleinerer zugeführt wird, um einen leeren Container zu füllen. Der Kreislauf endet, sobald der Container gefüllt ist und die Arbeitsvorbereitungen für den nächsten Durchgang abgeschlossen sind.

Um einen stationären Betrieb der Maschinen zu simulieren, erfolgten die Versuche mit den Zerkleinerern auf dem Werksgelände der Firma Pro Forst. Vor Ort konnten ausreichend Bündel gelagert werden, welche teils Tage und Wochen vorher von Lkw angeliefert wurden (s. Kapitel 3.3.3), um sie im Testbetrieb zu zerkleinern. Zur Beschickung wurde das Radbaggermodell Caterpillar M316D mit Schaufelgreifer beauftragt. Der Bagger setzte sich ausreichend Rohstoff für einen Zyklus in der Nähe der Zerkleinerer auf, so dass er seine Position während eines Durchlaufs nicht verändern musste. Der verwendete Trommelhacker findet sich mit einem eigenen Kran ausgestattet.

Innerhalb des Versuchsaufbaus wurde des Weiteren das Volumen der zerkleinerten Holzstücke als Bezugsmenge ermittelt. Das von den Zerspanern zerkleinerte Material gelangte durch die sich an den Maschinen befindlichen Förderbänder in bereitgestellte Abrollcontainer. Sofern diese vollständig befüllt waren, brachte man die Maschinen in Leerlaufdrehzahl und stellte einen leeren Container unter das Austragsförderband. Der Abschluss der Vorbereitung für einen neuen Durchlauf bildet das Zyklusende. Nach der Zerkleinerung des Holzes wurde es im Container eingeebnet; der Füllstand wurde an mehreren Stellen, gleichmäßig über die Oberfläche verteilt, gemessen. Bei diesem Vorgang legte man ein Richtscheit auf die Ränder des Containers und lotete mit Hilfe eines Messstabs die Distanz von der Unterkante der Latte zur Oberfläche der Ladung aus. Der Mittelwert der Messungen multipliziert mit Containerlänge und -breite wurde vom vorab ermittelten Gesamtvolumen der jeweiligen Container abgezogen – so konnte das tatsächlich angefallene Volumen des zerkleinerten Holzes berechnet werden.

Der Versuchsaufbau beim Jenz Hacker sah vor, dass die Zerkleinerung ebenfalls auf dem Werksgelände stattfand. Hierfür wurden Polter mit ausreichender Größe ausgewählt, um den logistischen Aufwand in Grenzen zu halten. Der am Hacker montierte Hydraulikkran beförderte die Bündel direkt vom Polter auf den Einzugstisch des Hackers; die Hackschnitzel schleuderte das Auswurfgebläse in den Container. Vor dem Abtransport der Container wurde ebenfalls die Füllhöhe (s. o.) bestimmt.

Da wiederum ein stationärer Einsatz gezeigt werden sollte, erfolgten die Zeitaufnahmen in gleicher Weise wie bei den Zerspanern. Das heißt, gemessen wurden ebenso die reine Arbeitszeit wie die allgemeine Zeit. Zum Vergleich der Systeme untereinander zieht die Studie allerdings ausschließlich die erstgenannte Größe heran. Das Rangieren der Containerfahrzeuge und die dadurch entstehenden Stillstandszeiten beim Hacker finden bei diesem Vergleich keine Berücksichtigung. Die Container wurden größtenteils in unmittelbarer Nähe entladen und dienten vorrangig der exakten Volumenbestimmung des zerkleinerten Materials.

3.4 Materialanalyse

Durch eine Untersuchung von Holzproben soll die qualitative Eignung des Waldrestholzes für eine industrielle Nutzung geprüft werden. Als Qualitätsmerkmale dienen hierzu der Wassergehalt und die Größenverteilung des zerkleinerten Materials. Die Probennahme erfolgt nach den in NEFF (2007) beschriebenen Verfahren gemäß der Norm CEN/TS 14778-1:2005 des Europäischen Instituts für Standardisierung (CEN, 2005). Bei diesem Vorgehen muss aller-

dings gewährleistet sein, dass die Probe die Partie, aus der sie stammt, gut repräsentiert. Entsprechend wurden diese bei den Aufnahmen zur zentralen Zerkleinerung (vgl. Abschnitt 3.3.4) jedem Container entnommen, in einem markierten Eimer luftdicht verschlossen und in einer Wildkühlung bei circa drei Grad Celsius bis zur weiteren Analyse aufbewahrt. Durch Reduktion wird die Hackschnitzelprobe auf eine Masse von 300 bis 400 Gramm gebracht und die exakte Masse notiert (CEN, 2005). Anschließend erfolgt eine Größenklassifizierung mittels manueller Siebung mit fünf geeichten Sieben mit Lochgrößen von 3,15 bis 63 Millimetern. Es ergeben sich infolgedessen sechs unterschiedliche Fraktionen (s. Tabelle 21), wobei das Material, das im Sieb mit 63 Millimeter Lochgröße verbleibt, einzeln vermessen und anschließend in die Kategorien 63 bis 100, 100 bis 200 sowie größer als 200 Millimeter eingeteilt wird.

Tabelle 21: Bezeichnung der verwendeten Siebe, der Maschenweite und der gesiebten Fraktionen.

Bezeichnung	Holzfraktion [mm]	
	von	bis
Sammelschale	0	3,15
Sieb P3	3,15	8
Sieb P8	8	16
Sieb P16	16	45
Sieb P45	45	63
Sieb P63	63	> 63

Darüber hinaus wurde für jede Probe eine Trockensubstanzbestimmung¹⁸ durchgeführt, wobei man gleichwohl mittels einer Probenreduktion eine Menge von etwa 25 Gramm absonderte. Anschließend wurde die Probe bei 105 ± 2 Grad Celsius mit dem Infrarotfeuchtemessgerät Sartorius MA 35 nach dem Verfahren der Thermogravimetrie bis zur Massenkonstanz getrocknet.

Um einen Vergleich der Bündlertechnik mit anderen Bereitstellungsverfahren für Waldrestholz zur ermöglichen, ist eine Umrechnung der erzeugten Bündel in eine andere, üblichere Einheit notwendig. Hierfür sollen in einer möglichst großen Stichprobe das Volumen und die Masse der Bündel gemessen werden. Die Bestimmung der Letzteren erfolgte unter anderem im Rahmen der Untersuchungen zum Bündeltransport, hierbei wurden die Fahrzeuge im beladenen Zustand gewogen. Die Masse der Ladung errechnete man durch Subtraktion der Leermasse des Lkws vom Gewicht des Transporters im bestückten Zustand.

In einem vorliegenden Fall werden die Bündel zunächst durch einen Trommelhacker zerkleinert und anschließend gewogen. Die Führer der Transportfahrzeuge waren angehalten, die Anzahl der zerkleinerten Bündel je Fuhre zu notieren, so dass auch hierbei eine entsprechende Ermittlung der Bündelmasse gegeben war. Bei Lieferungen an das Spanplattenwerk in Horn liegen die in den Abrechnungen angegebenen Werte der Trockenmasse sowie die Anzahl der Bündel vor.

¹⁸ Der Trockensubstanzanteil einer Probe ist gleich dem prozentualen Anteil der absolut trockenen Holzmasse zur Gesamtmasse: Der Wassergehalt (WG) ergibt sich entsprechend aus Subtraktion der Trockenmasse von der Gesamtmasse der Probe.

3.5 Vorauskalkulation der Kosten von Betriebsmitteln

3.5.1 Die produktive Arbeitszeit und Personalkosten

Der Erfassung des Statistischen Bundesamts (DESTATIS, 2015) zufolge sind Arbeitnehmer 2014 in Deutschland durchschnittlich 1317 Stunden ihrer Tätigkeit nachgegangen. Beachtlich ist der deutliche Unterschied zwischen Selbstständigen (2045 Stunden pro Jahr) und Arbeitnehmern, der dazu führt, dass sich der Durchschnitt aller Erwerbstätigen auf 1397 Stunden pro Erwerbstätigem beläuft.

Laut Arbeitszeitgesetz (ARBZG, 1994) dürfen Arbeitnehmer in Deutschland im Durchschnitt über sechs Monate maximal acht Stunden werktäglich arbeiten. Werktage fasst das Bundesurlaubsgesetz als (BURLG, 1964; §3 Abs. 2) „[...] *alle Kalendertage, die nicht Sonn- oder gesetzliche Feiertage sind.*“ Das Arbeiten an Letzteren ist grundsätzlich nicht gestattet, allerdings sind im Arbeitszeitgesetz (ARBZG, 1994) auch diverse Ausnahmen geregelt. Darüber hinaus schreibt das Gesetz vor, dass einem Arbeitnehmer bei einer Sechstageswoche jährlich mindestens 25 Tage Urlaub zustehen.

Im Bereich des gewerblichen Güterverkehrs sind über die Arbeitszeitregelungen des Bundes hinaus auch den Lenk- und Ruhezeiten im Rahmen der Verordnungen der Europäischen Union Rechnung zu tragen (VO (EG) 561/2006). Demnach darf die Wochenlenkzeit im Durchschnitt 45 Stunden nicht überschreiten, womit sich die maximal zulässige jährliche Arbeitszeit unter Berücksichtigung von Fehltagen durch Krankheit und Urlaub auf circa 1950 Arbeitsstunden pro Jahr reduziert.

Bei einer 40-Stunden-Woche und 30 Tagen Urlaub, wie es in einigen Arbeitsverhältnissen vorkommt (SOMMER ET AL., 2010), verringert sich die jährliche Arbeitszeit entsprechend auf 1659 Stunden (BAUA, 2013). Diese bilden die Grundlage für die Kalkulation der Kosten von Forst-, Stationärmaschinen und Lkw. Wenn die Einsatzdauer der Maschinen inklusive allgemeiner Zeiten die jährliche Arbeitszeit eines Vollarbeiters übersteigt, wird auf Aushilfsfahrer zurückgegriffen.

Zur Kalkulation von Personalkosten wird auf die Tariflöhne der jeweiligen Branchen zurückgegriffen: Der Ecklohn für Mitarbeiter in der Landwirtschaft in Nordrhein-Westfalen beträgt ab Januar 2013 gemäß der Lohntarifvereinbarung für Landarbeiter etwa 12 Euro je Stunde (LWK, 2013). Ein äquivalenter Tarifabschluss für Beschäftigte in der Forstwirtschaft existiert aktuell nicht. Der Tariflohn für Kraftfahrer im hier analysierten Bundesland beläuft sich auf circa 2300 Euro brutto pro Monat; ein Wert, der für Berufskraftfahrer mit mehrjähriger Berufserfahrung unter Berücksichtigung von Mehrarbeitszuschlägen für eine 45 Stundenwoche Gültigkeit erhebt (VER.DI, 2011; BERGRATH, 2010).

Zur Ermittlung der Personalkosten im Rahmen einer Maschinenkostenkalkulation sind neben den Informationen zur Arbeitszeit und den Bruttotariflöhnen auch die Lohnnebenkosten in Form von Arbeitgeberanteilen an den Sozialversicherungen zu berücksichtigen, die man vereinfacht mit 60 Prozent ansetzt. Da durch zahlreiche Aktivitäten der Maschinenführer während der Arbeitszeit, die nicht im direkten Konnex mit dem Betrieb der Maschine stehen, die Arbeiterzeit des Personals die Betriebsdauer der Maschine in der Regel überschreitet, ist

bei der Berechnung der Kosten einer Maschinenzeiteinheit ein entsprechender Aufschlag zu kalkulieren. Hierbei hilft die sogenannte ‚*Auslastungsquote der Maschine (aq)*‘ (vgl. JACKE 2007D), die das Verhältnis der Maschinenarbeitszeit zu der Arbeitszeit des Bedienpersonals der Maschine versinnbildlicht. Da die Arbeitszeit des Maschinenführers stets größer oder gleich der Einsatzstunden des Gerätes ist, ergibt sich daraus eine Auslastungsquote die kleiner oder gleich eins ist. Je kleiner die Auslastungsquote ist, je höher ist der Anteil der Kosten für das Bedienpersonal an einer Maschinenstunde.

3.5.2 Kraftstoff- und Stromkosten

Einen großen Anteil an den Betriebskosten einer Maschine machen mittlerweile die Betriebsstoffe aus, was nicht zuletzt den in den letzten Jahrzehnten stark gestiegenen Preisen für Kraftstoffe und Strom geschuldet ist. Diese Preisentwicklung der Energieträger in Deutschland hängt dabei von den internationalen Rohstoffmärkten, dem Wechselkurs des Euro gegenüber dem Dollar, staatlichen Eingriffen und Auflagen sowie anderen Faktoren ab (BMW, 2010). Das Statistische Bundesamt veröffentlicht regelmäßig Zeitreihen über die Veränderung der Preise für diverse Energieträger und -formen, unter anderem die Kurse für Dieseldieselkraftstoff bei Abgabe an Großverbraucher¹⁹. Berücksichtigt man die monatlichen Preisveränderungen am Stichtag bei einer repräsentativen Auswahl gewerblicher Unternehmen, wird ersichtlich, dass der Dieselpreis seit 2009 zwischenzeitlich um etwa 30 Prozent angehoben wurde (DESTATIS, 2019). Im Januar 2019 beträgt der Durchschnittspreis für Dieseldieselkraftstoff bei der Abgabe von Großmengen an Gewerbebetriebe etwa 97 Euro pro 100 Liter Kraftstoff ohne Umsatzsteuer und entspricht damit dem Wert aus 2009. Der Durchschnittspreis in 2018 ist mit 100 Euro pro 100 Liter Kraftstoff ohne Umsatzsteuer zu notieren. Dieser soll als Eingangswert für die Kostenkalkulation bei allen Maschinen mit Dieselmotoren verwendet werden.²⁰

Auch der Strompreis in Deutschland unterliegt gewissen Schwankungen, deren Ausmaß allerdings nicht so weitreichend ist wie bei Kraftstoffen. Für deutsche Endverbraucher setzt sich diese Größe aus dem eigentlichen Einkaufspreis, der alle Kosten sowie Deckungsbeiträge der Energieerzeuger beinhaltet, den Netzentgelten, Konzessionsabgaben, einer Förderumlage für erneuerbare Energien (EEG-Umlage) sowie für Kraft-Wärme-Kopplung (KWK-Umlage) zusammen. Hinzugerechnet werden müssen zudem die vom Bund erhobene Stromsteuer sowie die Mehrwertsteuer (BDEW, 2013; DÖRR ET AL., 2013). Der Gesamtstrompreis für einen Privathaushalt beläuft sich im Durchschnitt im Jahr 2012 auf etwa 26 Eurocent je Kilowattstunde (BDEW, 2013). Vergleichbar sind die Preise, die der Endverbraucher zu entrichten hat und die der Industrie jedoch nicht. Insbesondere das energieintensive Gewerbe kauft den Strom zu günstigeren Konditionen ein und kann von zahlreichen Ausnahmeregelungen von staatlichen Steuern und Abgaben profitieren. Dabei gilt: Je höher der Jahresverbrauch ist, desto geringer gestaltet sich der relative Anteil an Steuern und Abgaben für den Stromkunden. Bei einer Abnahme von 70 bis 150 Gigawattstunden im Jahr reduzieren sich

¹⁹ Lieferung von mindestens 5000 Litern frei Verbrauchsstelle.

²⁰ Bei Abnahme haushaltsüblicher Mengen an der Tankstelle beträgt der Durchschnittspreis für Dieseldieselkraftstoff 1,25 Euro je Liter ohne Umsatzsteuer im gleichen Zeitraum 2012.

die Kosten auf durchschnittlich etwa acht Eurocent pro Kilowattstunde für entsprechende Industriekunden, wie beispielsweise die Stahlbranche (DESTATIS, 2013D).

Für gewerbliche Kunden mit einem Strombedarf von 160 Mega- bis 20 Gigawattstunden jährlich, bei einer mittelspannungsseitigen Versorgung, ist ein Strompreis von 15 Eurocent pro Kilowattstunde (Durchschnittspreis von Januar bis Juni 2013) zu entrichten (BDEW, 2013; BMWi, 2013).

3.5.3 Kalkulation der Kosten von Forst- und Stationärmaschinen

Damit eine ökonomische Bewertung der Arbeitsverfahren vorgenommen werden kann, ist zudem eine Kalkulation der Kosten der eingesetzten Betriebsmittel notwendig. Da in diesem Zusammenhang der Vergleich von Bereitstellungsketten im Mittelpunkt des Interesses steht und nicht die unternehmensspezifischen Herstellungskosten, zieht diese Studie aus Gründen der Simplifizierung die Kosten heran, die unmittelbar mit dem Maschineneinsatz in Verbindung stehen. Der für den kommerziellen Erfolg beim Betrieb der Maschinen notwendigerweise zu erwirtschaftende Gewinn, bleibt bei den Kalkulationen unberücksichtigt. Ebenfalls werden Ausgaben für Risiken und gewisse Gemeinkosten, die nicht verursachungsgerecht erfasst werden, außer Acht gelassen. Da des Weiteren von konstanten jährlichen Einsatzzeiten ausgegangen wird, eignet sich für die Kalkulation von Forstmaschinen die Ingenieurformel, die zur Kostenermittlung von selbstfahrenden Maschinen angewendet wird. Aus der betrieblichen Sicht eines Unternehmers empfiehlt es sich, weitere oben genannte Faktoren präventiv zu berücksichtigen (vgl. DREEKE, 2010).

Die bei JACKE ET AL. (2013) und auch anderen Untersuchungen (vgl. KWF, 2013; FORBRIG ET AL., 2004; LÖFFLER, 1989) verwendete Ingenieurformel berücksichtigt zur Kostenermittlung des Faktoreinsatzes folgende Posten:

- • Abschreibungen
- • kalkulatorischer Zins
- • Kosten der Wartung und Reparatur
- • Betriebsstoffe (Treibstoff, Schmiermittel, etc.)
- • Personalkosten
- • Sonstige Kosten.

Bei der Bereitstellung von Waldrestholz zählen Forstmaschinen zu den zwangsläufig eingesetzten Betriebsmitteln; Tabelle 22 liefert eine Übersicht der im Vergleich der Bereitstellungsketten verwendeten Geräte.

Tabelle 22: Listenpreis und Bezeichnung der kalkulierten Forstmaschinen.

	Bezeichnung	Listenpreis (2013)
Forwarder	Pinox P818	235.700 EUR
Kombimaschine	Pinox P828	287.500 EUR
Bündlereinheit	Pinox P330	152.000 EUR

Darüber hinaus werden weitere Betriebsmittel zur Zerkleinerung und Konfektionierung des Waldrestholzes herangezogen. Handelt es sich hierbei um stationäre Gerätschaften (s. Tabelle 23), wird die Vorkalkulation der Kosten ebenfalls mit Hilfe der Ingenieurformel durchgeführt.

Tabelle 23: Listenpreis und Bezeichnung der kalkulierten stationären Maschinen.

	Bezeichnung	Listenpreis (2013)
Vorbereiter	Hammel VB750D	257.000 EUR
Zerspaner Diesel	Komptech Crambo 5000D	288.000 EUR
Zerspaner Elektro	Komptech Crambo 5000E	244.000 EUR
Sternsiebanlage	Komptech Multistar M3	217.000 EUR

Zur Anwendung dieser ist dabei zahlreichen Parametern Rechnung zu tragen: Soweit diese nicht von den Herstellern angegeben (Listenpreis, teilweise Nutzungsdauer, partiell Reparatur- und Wartungskosten, Schmiermittelfaktor) oder im Rahmen der Zeitstudien ermittelt werden (teilweise Treibstoffverbrauch), beruhen die wesentlichen Eingabeparameter auf dem von JACKE (2013) empfohlenen Kalkulationsschema. Für die Kostenkalkulationen wird ein Satz zur Berechnung kalkulatorischer Zinsen in Höhe von acht Prozent unterstellt; sonstige Ausgaben enthalten Kosten für Verwaltung, Versicherung, Beiträge und Ähnliches, sie werden mit 14 Prozent des Beschaffungspreises jährlich veranschlagt.

Für die Maschinen der Firma Komptech liegen Ersatzteillisten für alle dem Verschleiß unterliegenden Maschinenteile vor. Die jeweiligen Ersatzteile sind mit ihrer verbauten Anzahl, der Standzeit („Service-Life“), also der technisch nutzbaren Periode, und dem Preis versehen. Unter anderem anhand dieser Angaben lässt sich der aus wirtschaftlicher Sicht - unter der Prämisse der Kostenminimierung - optimale Zeitpunkt der Maschinenneuanschaffung bestimmen. Die sich ergebende Nutzungsdauer entspricht in der Regel nicht der aus technischer Sicht maximal möglichen Einsatzzeit, sondern eher einem „Economic-Life“, einem aus wirtschaftlicher Perspektive bestmöglichen Moment, die Maschine auszutauschen.

Kalkulationstabellen für die untersuchten Maschinen werden im Folgenden beschrieben oder sind im Anhang dieser Arbeit zu finden. Eingangsdaten, Berechnungsgrundlagen sowie Ergebnisse befinden sich in unterschiedlichen Tabellen. Da diese für die jeweiligen Betriebsmittel aufeinander aufbauen, werden sie fortlaufend mit Groß- und Kleinbuchstaben beschriftet. Um Rechenweg nachvollziehen zu können, sind die einzelnen Tabellenzeilen fortlaufend nummeriert. Spezifische Personal-, Kosten- und Finanzierungsstrukturen der jeweiligen Unternehmen können im Detail zu abweichenden Ergebnissen führen.

3.5.4 Kalkulation der Kosten von Lkw

In Abhängigkeit von der Transportentfernung zwischen Wald und dem Ort der Holzverwendung kann es durch mangelnde Abstimmung zu unnötigen Stillstandszeiten der eingesetzten Fahrzeuge oder des Hackers kommen. Obwohl der Hacker in der Regel die teuerste Maschine im System darstellt, kann je nachdem, bei welchem Prozessschritt die meisten ablaufbedingten Wartezeiten auftreten, die Summe der Kosten der Transportfahrzeuge die des Hackers übersteigen. Insbesondere dann, wenn die Transportkapazitäten nicht sorgsam und optimal auf die Hackerleistung abgestimmt werden (WITTKOPF, 2005). Empfehlenswert ist aus diesem Grund eine vertiefte Kenntnis über die entfernungsabhängigen Ausgaben, aber auch über diejenigen für Warte- und Stillstandszeiten der Lkw. Deutlich zeigt sich hier, dass eine intensive Beschäftigung mit dem Lkw-Transport zwingend notwendig ist. Nach WITTKOPF (2005) und WITTKOPF ET AL. (2003) ist der Lkw mit Hakenliftgerät zur Aufnahme großvolumiger Wechselcontainer das gängigste Transportmittel für die industrielle Verwendung von Waldhackgut. Tabelle 24 zeigt die fahrzeugspezifischen Eingangsdaten zur Kostenkalkulation eines Container-Lkws am Beispiel des Mercedes Benz MB 2544 mit entsprechendem Aufbau.

Tabelle 24: Kostenkalkulation Abrollkipper Lkw (a): Spezifische Eingangsdaten.

A_a	Eingangsdaten Abrollkipper	Gliederzug	Zugmaschine	Anhänger
	<i>Motorleistung</i>	440 PS		
	<i>Nutzlast</i>	20 t		
	<i>Max. theor. Ladevolumen</i>	80 m ³	40 m ³	40 m ³
	<i>Füllungsgrad</i>	90 %		
	<i>Max. tats. Ladevolumen</i>	72 m ³	36 m ³	36 m ³
1.	Beschaffungspreis ohne USt.	141.000 €	113.000 €	28.000 €
2.	Veralterungszeit		7 Jahre	10 Jahre
3.	Restwert	14.000 €	11.000 €	3.000 €
4.	Anzahl der Reifen	12	8	4
5.	Reifenlaufleistung		180.000 km	250.000 km
6.	Wiederbesch.-preis Reifen	5.500 €	3.500 €	2.000 €
7.	Treibstoffverbrauch Leerfahrt			
7.a	Unbefestigte Waldwege	65 l/100 km	60 l/100 km	
7.b	Befestigte Waldwege	27,5 l/100 km	25 l/100 km	
7.c	Öffentliche Straße	24,75 l/100 km	22,5 l/100 km	
8.	Treibstoffverbrauch Lastfahrt			
8.a	Unbefestigte Waldwege	115 l/100 km	90 l/100 km	
8.b	Befestigte Waldwege	47,5 l/100 km	37,5 l/100 km	
8.c	Öffentliche Straße	42,75 l/100 km	35 l/100 km	
9.	Treibstoffverbrauch Be- und Entladen	5 l/h		

Der Beschaffungspreis orientiert sich an den Ergebnissen von KÜHMAIER ET AL. (2007) und der verzeichneten Kostenentwicklung in Deutschland (DESTATIS, 2013c). Da unter logistischen Gesichtspunkten eine Beförderung ohne Anhänger denkbar ist, wird nach MONEGO (2010) ein reduzierter Treibstoffverbrauch im Modell bei Fahrten ohne Anhänger angewendet.

Für den Transport der Restholzbündel soll ein konventioneller Kurzholz-Lkw eingesetzt werden. Tabelle 25 veranschaulicht die Eingangsdaten für die Kostenkalkulation eines Kurzholzzuges am Exempel des Mercedes Benz MB 2648 LL 6*4 (s. Tabelle 2.3-21 im Anhang). Das Volumen wird anders als normalerweise üblich in der Anzahl durchschnittlich geladener Bündel angegeben. Der Wert resultiert aus den Überprüfungen der Materialbeschaffenheit von Bündeln (s. Kapitel 4.1).

Tabelle 25: Kostenkalkulation Kurzholzzug (k): Spezifische Eingangsdaten.

A_k	Eingangsdaten Kurzholzzug	Gliederzug	Zugmaschine	Anhänger
	<i>Motorleistung</i>	480 PS		
	<i>Nutzlast</i>	21 t		
	<i>Ladevolumen</i>	50 Bündel		
1.	Beschaffungspreis ohne USt.	207.000 €	173.000 €	34.000 €
2.	Veralterungszeit		7 Jahre	10 Jahre
3.	Restwert	21.000 €	17.000 €	4.000 €
4.	Anzahl der Reifen	12	8	4
5.	Reifenlaufleistung		180.000 km	250.000 km
6.	Wiederbesch.-preis Reifen	6.000 €	4.000 €	2.000 €
7.	Treibstoffverbrauch Leerfahrt			
7.a	Unbefestigte Waldwege	65 l/100 km		
7.b	Befestigte Waldwege	27,5 l/100 km		
7.c	Öffentliche Straße	27,5 l/100 km		
8.	Treibstoffverbrauch Lastfahrt			
8.a	Unbefestigte Waldwege	115 l/100 km		
8.b	Befestigte Waldwege	47,5 l/100 km		
8.c	Öffentliche Straße	47,5 l/100 km		
9.	Treibstoffverbrauch Be- und Entladen	5 l/h		

Die wichtigsten Eingabeparameter für die Kostenkalkulation beider Modelle sind der Tabelle 26 zu entnehmen, so dass eine überschlägige Berechnung erleichtert wird. Im konkreten Einzelfall jedoch kann die Verwendung differenzierender Annahmen vonnöten sein, um eine individuelle Abschätzung der Ausgaben zu erhalten. Um Ergebnisse besser nachvollziehen zu können, sind die zusammengehörigen Tabellen fortlaufend beschriftet und die Zeilen nummeriert.

In der Realität können, beispielsweise durch einen höheren Anteil an Rückladungen, die Leerfahrtenquote und damit die gesamten frachtabhängigen Kosten, das heißt die Kosten je transportierter Masse, reduziert werden. Durch den höheren Anteil an Lastfahrten steigt allerdings auch der Kraftstoffverbrauch pro Tour – Folge können höhere Kosten je Einsatzdauer bei gleicher Auslastung sein. Es ist jedoch nicht durchführbar, derartige Zusammenhänge im Rahmen der vorliegenden Betrachtungsweise zu berücksichtigen, so dass vereinfacht von einer Leerfahrtenquote von 0,5 ausgegangen wird (vgl. BROKMEIER, 2013C), was durchaus einen realistischen Wert für den Transport von Hackmaterial aus dem Wald darstellt (KEMPER, 2013).

Tabelle 26: Kostenkalkulation Abrollkipper und Kurzholzzug: Kalkulationsdaten.

B_a, B_k	Kalkulationsdaten allgemein	Annahme
10.	Jahreseinsatzzeit	2.106 h
11.	Jahreslaufleistung	100.000 km
12.	Umlaufvermögen	20.000 €
13.	Kalkulat. Zinsfuß	8 %
14.	Reparaturkostenquote	0,7
15.	Schmiermittelfaktor	0,03
16.	Treibstoffkosten	1,18 €/l
17.	Mautsatz	0,16 €/km
18.	Leerfahrtenquote	0,5
19.	Polteranfahrt Waldwege	2,5 km
20.	Holzabfuhr Waldwege	1,5 km
21.	Anteil unbefestigte Waldwege	0,3

Die Personalkosten (s. Tabelle 27) üben in der Regel einen großen Einfluss auf die Gesamtkosten im Transportgewerbe (KEIDAT, 2010) aus, spielen aber für den Vergleich der Bereitstellungsketten eine untergeordnete Rolle, da beide Verfahrensvarianten zunächst mit denselben Eingangsdaten kalkuliert werden. Die Personalkosten sind hierbei als Fixkosten zu werten, die mit einem jährlichen Arbeitsentgelt angegeben sind. Grund hierfür ist die gesetzlich beschränkte Arbeitszeit des Fahrers (s. Kapitel 3.5.1), die dazu führt, dass Lkw, die mit festen Führern besetzt sind, nur knapp zu einem Drittel ausgelastet werden (GATHER ET AL., 2013). Personalwechsel kann eine Lösung zur Erhöhung der Jahreseinsatzdauer der Lkw darstellen, man greift in diesen Fällen zumeist auf sogenannte ‚*Springer*‘ zurück. Bei diesen handelt es sich um Fahrer, die ersatzweise (bei Krankheit oder Urlaub des Stammfahrers oder am Samstag) Touren übernehmen. Dieser Tatsache wird durch den Fahrerfaktor Rechnung getragen, indem der Faktor größer als eins gesetzt wird.

Tabelle 27: Kostenkalkulation Lkw-Abrollkipper und Kurzholzzug: Personal.

C_a, C_k	Kalkulationsdaten Personal	Annahme
22.	Jahresbruttolohn	28.000 €
23.	AG-Anteil Sozialaufwendungen	16.800 €
24.	Spesen	4.000 €
25.	Auslastungsquote der Maschine (aq)	0,9
26.	Fahrerfaktor	1,2

3.5.5 Die Kalkulation der Kosten von Aufbau- und Anhängenhackern

Es ist der aufwendigen Organisation im Arbeitsablauf bei der mobilen Hackung geschuldet, dass es häufig zu einem erhöhten Zeitaufwand für das ablaufbedingte Warten der Hacker kommt. Folge dieser Entwicklung ist, dass die geplante jährliche Laufleistung unter Umständen nicht erreicht wird. Anders als WITTKOPF (2005) in seinem Modell zur Abstimmung von

Hack- und Transportleistung herausstellt, ist nicht zwangsläufig davon auszugehen, dass bei Stillstandszeiten des Hackers die gleichen Kosten je Zeiteinheit entstehen, wie sie bei seinem Betrieb anfallen. Vielmehr ist zu erwarten, dass aufgrund einer Vielzahl von Stillstandszeiten die Auslastungsquote der Maschine sinkt und gegebenenfalls eine geringere jährliche Laufleistung erreicht wird, was wiederum zu höheren Durchschnittskosten führt. Nichtsdestotrotz fallen für Stillstandszeiten die durchschnittlichen Fixkosten je Maschinenstunde an.

Die entstehenden Ausgaben unterscheiden sich dabei, abhängig von der Veränderung der Bezugsgröße, in fixe und variable jährliche Kosten. Die Höhe letzterer richtet sich nach dem Einsatz einer Bezugsgröße und verhält sich äquivalent zu dieser, hingegen zeigen sich die feststehenden Abgaben unabhängig von anderen Variablen und deren Veränderung (HOITSCH ET AL., 1999). Eine Bezugsgröße in dem hier verwandten Sinne kann für eine Forstmaschine die Betriebsstunde oder die jährliche Produktion an Holz verkörpern. Beziehen sich die Kosten jedoch auf die Referenzgröße, beispielsweise Ausgaben pro Betriebsstunde, variieren die Fixkosten je nach Intensität der Nutzung: Mit zunehmendem Ausmaß der Inanspruchnahme sinken die feststehenden Beträge je Bezugsgröße und umgekehrt (JACKE ET AL., 2004).

Betrachtet man eine selbstfahrende Arbeitsmaschine, handelt es sich bei den fixen Beträgen im engeren Sinne um sprungfixe (semivariable) Kosten (WEBER, 2013). Da Maschinen nicht beliebig teilbare Produktionsfaktoren sind und ihnen eine Kapazitätsgrenze innewohnt, können die fixen Kosten nicht für unbestimmt hohe Produktionsmengen herangezogen werden. Das heißt, solange nur eine Maschine im Einsatz ist und ihre Kapazitätsgrenze nicht überschritten wird, gestaltet sich die Höhe der Fixkosten gleichbleibend und unabhängig von ihrer Einsatzdauer. Sollte aufgrund der Überschreitung der Kapazitätsgrenze der ersten Maschine die Anschaffung einer zweiten Maschine notwendig sein, springen die fixen Ausgaben auf ein höheres Niveau und verhalten sich wiederum bis zum Erreichen der Kapazitätsgrenze für zwei Maschinen gleich.

Auf Basis der von JACKE (2007B) aufgestellten Kalkulation wird der Einfluss wechselnder jährlicher Einsatzzeiten auf die fixen und variablen Kosten beim Betrieb eines mobilen Aufbau- oder Anhängenhackers untersucht. Der Berechnung liegen folgende Eingangsdaten zugrunde:

Tabelle 28: Kostenkalkulation Anhängenhacker inkl. Zugfahrzeug (h): Eingangsdaten.

A_h Eingangsdaten Anhängenhacker	
<i>Motorleistung</i>	<i>243 kW</i>
<i>Durchsatz (max.)</i>	<i>120 SRm/BS</i>
1. Beschaffungspreis ohne USt.	400.000 €
2. Veralterungszeit	10 Jahre
3. Nutzungsdauer	15.000 BS
4. Restwert	40.000 €
5. Durchschn. Treibstoffverbrauch	40 l/BS

Die Kalkulation gilt für einen Zapfwellenbetriebenen Anhängenhacker inklusive eines landwirtschaftlichen Schleppers als Zug- und Antriebsfahrzeug. Als Beispiel wird an dieser Stelle die Kombination aus Jenz Hacker HEM 561Z und dem Fendt Schlepper 936 Vario gewählt, dessen Neupreis sich für das Gespann auf circa 400 Tausend Euro beläuft (KEMPER, 2013). Der Restwert wird wie bei allen Kalkulationen dieser Arbeit mit 10 Prozent des Beschaffungspreises angesetzt.

Tabelle 29: Kostenkalkulation Anhängenhacker: allgemeine Kalkulationsdaten.

B_h	Kalkulationsdaten allgemein	Annahme
6.	Kalkulat. Zinsfuß	8 %
7.	Treibstoffkosten	1,18 €/l

Zur Berechnung der kalkulatorischen Zinsen wird standardmäßig ein Zinssatz von acht Prozent angenommen (Tabelle 29). Der Dieselpreis, berechnet mit 1,18 Euro je Liter, bezieht sich auf den Nettopreis für den Kraftstoff einer Anlieferung größerer Mengen an Geschäftskunden (vgl. Kapitel 3.5.2).

Tabelle 30: Kostenkalkulation Anhängenhacker: Personalkosten.

C_h	Kalkulationsdaten Personal	Annahme
8.	Jahresbruttolohn	24.000 €
9.	AG-Anteil Sozialaufwendungen	14.400 €
10.	Stundenlohn Aushilfsfahrer	28 €/BS

Die veranschlagten Personalkosten erheben für einen vollbeschäftigten Landarbeiter mit Berufsausbildung Gültigkeit (vgl. Kapitel 3.5.1), wobei sich unter Berücksichtigung von Urlaubs- und Krankentagen sowie der durchschnittlichen Auslastungsquote ein zu kalkulierender Stundensatz von 28 Euro je Betriebsstunde ergibt, sofern der Maschinenführer stundenweise, zum Beispiel als Springer, eingesetzt wird.

3.6 Vergleich von Bereitstellungsketten

Unter Systemvergleich versteht man die Ermittlung von Entscheidungshilfen, mit denen aus mehreren geeigneten Verfahren das bestmögliche ausgewählt wird (MAYBAUM ET AL., 2011). Dabei existieren unterschiedliche Zielgrößen für diese (Tabelle 31), jedoch beschränkt man sich in der Regel darauf, die Wirtschaftlichkeit als Zielgröße anzustreben, obwohl eine Reihe weiterer Zielgrößen wie zum Beispiel Leistungsfähigkeit, organisatorische Eignung, Unfallsicherheit und Umweltbeeinträchtigung existieren und in die Entscheidungsfindung einfließen können. Es ist möglich, den Systemvergleich nach einem wirtschaftlichen und qualitativen Vergleich zu differenzieren.

Tabelle 31: Zielgrößen und deren Kriterien für die Entscheidungsfindung.

Teilziele	Kriterien
Wirtschaftlichkeit	Kosten
Leistungsfähigkeit	Dauer der Maßnahme (Zeitfenster Witterung)
Organisation	Verfügbarkeit von Spezialmaschinen, Einweisungspersonal, Wegedichte etc.
Produktqualität	Hackschnitzzeleigenschaften, ganzjährige Verfügbarkeit
Unfallsicherheit	Bei vollmechanisierten Verfahren zu vernachlässigen
Umweltbeeinträchtigung	Rückeschäden, Zeitpunkt von Ernte und Transport

Bei einem wirtschaftlichen Vergleich sollten vorrangig der notwendige Kapitalbedarf oder auch die Abschätzung der zukünftigen Maschinenauslastung die Wahl eines Verfahrens beeinflussen. In der Regel jedoch basiert die Entscheidung vorrangig auf der Bewertung der Systemkosten. Zur Ermittlung dieser wird eine kalkulatorische Verfahrensgegenüberstellung durchgeführt (Abbildung 34), wobei die Ergebnisse als Gesamtkosten oder Ausgaben je Einheit angegeben werden.

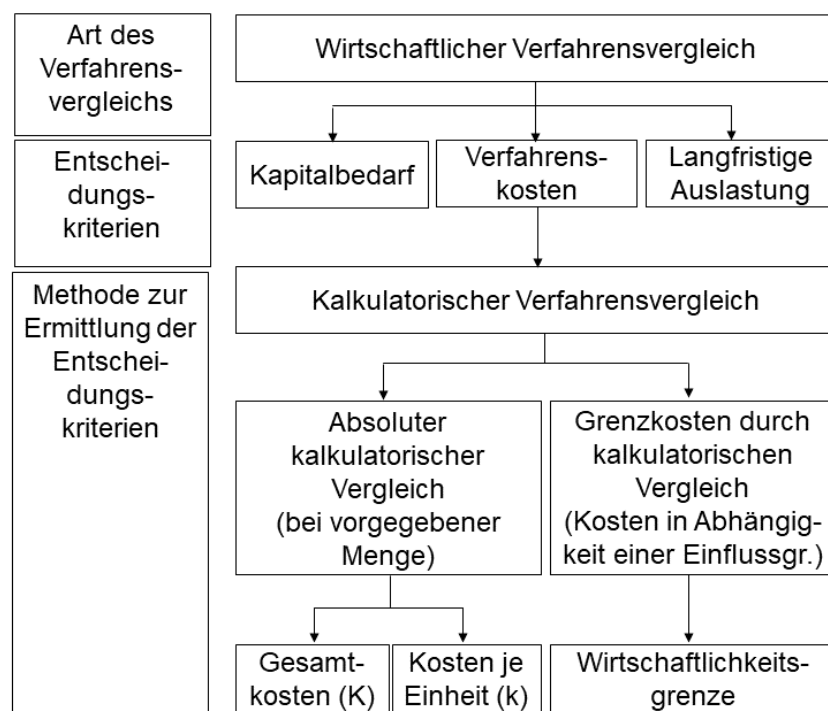


Abbildung 34: Die Methoden zur Ermittlung der Entscheidungskriterien bei einem wirtschaftlichen Verfahrensvergleich (MAYBAUM ET AL., 2011, verändert).

Da sich eine Bereitstellungskette wie im vorliegenden Fall aus mehreren einzelnen Arbeitssystemen beziehungsweise -verfahren zusammensetzen kann (vgl. REFA, 2004), sind zur Abschätzung der Gesamtkosten die Ermittlung der Leistungskennwerte, also der Arbeitsbeziehungsweise Betriebsmittelstundenbedarf je Leistungseinheit (Produktivität), und der Kosten der einzelnen Aktivitäten sowie der wichtigsten, sie beeinflussenden Faktoren not-

wendig. Tabelle 32 verbildlicht die Zusammensetzung der Gesamtkosten von Kette 1 (mobile Zerkleinerung) und Kette 2 (stationäre Zerkleinerung).

Tabelle 32: Die Berechnung der Gesamtkosten (K) und der Kosten der einzelnen Prozessstufen (k) bei der mobilen (Kette 1) und der stationären (Kette 2) Zerkleinerung von Waldrestholz (B = Bündeln; R = Rücken; T = Ferntransport; Z = Zerkleinerung; S = Siebung).

	Bereitstellungskette 1	Bereitstellungskette 2
B	---	$k(B) = \frac{N(B)}{L} \cdot k_{MAS}$
R	$k(R_1) = \frac{V(Holz)}{L} \cdot k_{MAS}$	$k(R_2) = \frac{N(B)}{L} \cdot k_{MAS}$
T	$k(Lkw) = N(Tour) \cdot [Z_{Tour} \cdot k_{MAS}(Lkw) + d_T \cdot 2 \cdot k_{var}(Lkw)]$	
Z	$k(Z_1) = Z_{MAS} \cdot k_{MAS} + Z_w \cdot k_{fix}$	$k(Z_2) = \frac{N(B)}{L} \cdot k_{MAS}$
S	$k(S_1) = \frac{V(Holz)}{L} \cdot k_{MAS} + \frac{V(Holz)}{L} \cdot k_{MAS}$	$k(S_2) = \frac{N(B)}{L} \cdot k_{MAS}$
Σ	$K_1 = k(R_1) + k(Lkw) + k(Z_1) + k(S_1)$	$K_2 = k(B) + k(R_2) + k(Lkw) + k(Z_2) + k(S_2)$

Hier gilt:

- $N(B)$ = Anzahl Bündel der Erntemaßnahme [St.]
- $V(Holz)$ = Gesamtholzvolumen der Erntemaßnahme [SRm]
- L = Leistungskennwert der jeweiligen Betriebsmittel
- k_{MAS} = Kalkulierte Kosten für den Betriebsmitteleinsatz [EUR/MAS]
- k_{var} = Kalkulierte variable Kosten [EUR/km]
- k_{fix} = Kalkulierte fixe Kosten [EUR/h]
- $N(Tour)$ = Anzahl notwendiger Touren, um das Holz abzutransportieren
- d_T = Einfache Transportentfernung [km]
- Z_{Tour} = Zeitbedarf Lkw pro Tour [h]
- Z_{MAS} = Produktive Zeit Hacker [h]
- Z_w = Wartezeit Hacker [h].

3.7 Auswertung der gewonnenen Daten

3.7.1 Leistung und Zeitbedarf

Sofern zur Quantifizierung von Zusammenhängen zwischen Leistung beziehungsweise Zeitbedarf und maßgeblichen Einflussvariablen definierte Arbeitszeiten verwendet werden, erfolgen Vergleich und Umrechnung grundsätzlich nach der in Tabelle 33 genannten Definition.

Tabelle 33: Definition der Arbeitszeiten.

GAZ	
RAZ	AZ
MAS = BS	AZ > 15 min

GAZ = Gesamtarbeitszeit
RAZ = Reine Arbeitszeit
AZ = Allgemeine Zeiten
MAS = Maschinenarbeitsstunde
BS = Betriebsstunde

Demnach setzt sich die Gesamtarbeitszeit (GAZ) aus der reinen Arbeitszeit (RAZ) und den allgemeinen Zeiten (AZ), zum Beispiel für Wartung, Rüsten und Umsetzen (sachliche Verteilzeiten) und andere Unterbrechungen der produktiven Nutzung der Maschine innerhalb der Arbeitszeit, zusammen. Die RAZ entspricht der reinen Arbeitszeit: Störungen, Verteilzeiten und Ähnliches finden keine Berücksichtigung. Bei Produktivitätswerten, angegeben als Maschinenarbeitsstunde (MAS), werden alle Unterbrechungen der produktiven Maschinennutzung, darunter auch die persönlichen Verteilzeiten des Maschinenführers, die länger sind als 15 Minuten, separat betrachtet. Alle kürzeren Unterbrechungen schlägt man den MAS zu (vgl. BODELSCHWINGH, 2005).

Die meisten Forstmaschinen weisen die Betriebszeit auf Grundlage der Betriebsstunden (BS) der Maschinen nach, wobei anhand der Umdrehungen an einer Getriebewelle über einen Lichtmaschinenzusatz oder über einen CAN-Bus im Rahmen der Maschinensteuerung gemessen wird. Im Gegensatz zu MAS können Betriebsstunden lediglich dann gezählt werden, wenn das Gerät in Betrieb ist, also der Motor läuft (JACKE, 2007D). In diesem Fall setzt sich eine Betriebsstunde aus der reinen Arbeitszeit und sämtlichen Unterbrechungen, bei denen sich die Maschine im eingeschalteten Zustand befindet, die aber nicht zwangsläufig mit dem eigentlichen Arbeitsablauf in Verbindung stehen müssen, zusammen. Hierzu zählen beispielsweise das Umsetzen auf eigener Achse, Service (warmlaufen lassen, mobile Tankanlage transportieren, Ketten und Bänder aufziehen etc.), Reparaturen mit laufendem Motor oder Ähnliches. Für den Unternehmer sind derartige Unterscheidungen nicht relevant, da für ihn eine Betriebsstunde – egal, ob es sich um reine Arbeitszeit handelt oder einer der geschilderten Tätigkeiten nachgegangen wird – annähernd die identischen Kosten darstellt sowie die gleiche Abnutzung der Maschine bedeutet.

Um einen Vergleich innerhalb dieser Arbeit zu ermöglichen, müssen infolgedessen divergierende Definitionen der Zeiten herangezogen werden. Bei den Zeitstudien und innerhalb der Fachforschung dient die RAZ (AS) als Zeitkategorie für die Auswertung der Produktivitätswerte. Bei den Leistungsaufzeichnungen wird die BS und für die Kostenkalkulation die MAS als Messgröße verwendet (vgl. EBERHARDINGER, 2011; LÖFFLER, 1989). Um die MAS auf die BS umzurechnen, wird im weiteren davon ausgegangen, dass die bei der MAS beinhalteten Unterbrechungen mit einer Dauer von weniger als 15 Minuten in etwa den gleichen Umfang besitzen wie die oben genannten unproduktiven Momente, die bei der Betriebsstundenzählung unweigerlich miterfasst werden. Sofern eine Umrechnung erforderlich ist, beispielsweise im Rahmen der Kostenkalkulation, stellt die vorliegende Arbeit die BS einer MAS gleich (s. Tabelle 33). Um Ergebnisse anderer Studien, die in der Kategorie RAZ angegeben sind, mit den Resultaten dieser Arbeit vergleichbar zu machen, erfolgt im Weiteren ein pauschaler Zuschlag für die AZ in Höhe von 15 Prozent der RAZ (vgl. BURGER, 2010; SPINELLI ET AL., 2008). Zur Umrechnung der MAS auf die RAZ wird demnach davon ausgegangen, dass die auf die RAZ bezogene Produktivität um 15 Prozent höher liegt im Vergleich zu der auf die MAS bezogene Produktivität.

3.7.2 Statistische Auswertung

Die statistische Datenanalyse wurde mit Hilfe der Programme Statistica-Basic oder R durchgeführt, wobei auf die in den gängigen Lehrbüchern beschriebenen Methoden zur statistischen Auswertung und Interpretation der empirischen Daten rekuriert wird (u. a. KÖHLER ET AL., 2007; SACHS ET AL., 2006).

Die deskriptive Statistik dient zur Beschreibung, Überprüfung und Beurteilung der Verteilung der zu analysierenden Variablen. Als Mittelwert werden das arithmetische Mittel (\bar{x}) und falls erforderlich der Median (Z) berechnet, zur Beschreibung der Streuung der Variablen dienen Standardabweichung (s) und Spannweite (Min/Max).

Die meisten Verfahren der schließenden Statistik setzen intervallskalierte und normalverteilte Daten sowie homogene Varianzen voraus. Die Überprüfung der Datenmenge auf Normalverteilung erfolgt bei Grundgesamtheiten kleiner als 50 Einzelwerten ausschließlich durch den Shapiro-Wilks-Test, liegt die Anzahl der Einzelwerte über dem genannten Wert, greift man auf den Kolmogorov-Smirnov-Test zurück (YAZICI ET AL., 2007).

Zur Untersuchung der Beziehung zwischen zwei Variablen wird bei normalverteilten Daten der Maßkorrelationskoeffizient (r) nach PEARSON ermittelt, sofern von einem linearen Zusammenhang ausgegangen werden kann. Andernfalls erfolgt die Berechnung des Korrelationskoeffizienten nach SPEARMAN. Um festzustellen, ob sich zwei Mittelwerte unterscheiden, führt man einen t-Test für unabhängige Stichproben durch, vorausgesetzt dass die Grundgesamtheiten normalverteilt sind. Ist dies nicht der Fall, untersucht man auf signifikante Unterschiede der Mittelwerte anhand eines MANN-WHITNEY-(U)-Tests. Sollen die Mittelwerte von mehreren Gruppen (Faktorstufen) verglichen werden, findet eine Varianzanalyse (ANOVA) statt, wobei die Varianz (s^2) der Stichprobenmittelwerte um den Gesamtmittelwert errechnet wird. Unterstellt man, dass kein Unterschied zwischen den Stichproben besteht, müssten die Stichprobenmittelwerte gleich dem Gesamtmittelwert aller Stichproben sein. Die berechnete Teststatistik ist F-verteilt und muss daher zur Verifizierung der Signifikanz mit dem kritischen Wert auf der durch die Freiheitsgrade bestimmten theoretischen F-Verteilung verglichen werden. Hierbei soll hinterfragt werden, ob signifikante Differenzen zwischen den Mittelwerten der Klassen auftreten. Jedoch wird keine Auskunft darüber geliefert, welche der Gruppen sich charakteristisch von den anderen unterscheidet oder ob sogar alle voneinander entscheidend abweichen. Um zusätzlich nähere Informationen zu gewinnen, kann anschließend ein Post-hoc-Test durchgeführt werden, bei dem die Mittelwerte einzelner Klassen mit Hilfe eines t-Tests überprüft werden. Die Signifikanz bei allen Tests wird durch den p-Wert (p) ausgegeben. Liegt dieser unterhalb des Signifikanzniveaus ($\alpha = 0,05$), ist davon auszugehen, dass mit einer Fehlerwahrscheinlichkeit von weniger als fünf Prozent die Mittelwerte voneinander differenzieren.

Zur weiteren Analyse und zur Erstellung eines Produktivitätsmodells berechnet man eine schrittweise multiple Regression, durch die Aussagen über die Art des Zusammenhangs zwischen der Produktivität und einer beziehungsweise mehrerer Variablen angestellt werden. Durch die Vorgehensweise bei einer schrittweisen multiplen Regression ergibt sich die Reihenfolge, in der die Variablen in das Modell aufgenommen werden, indem bei jedem Voran-

gehen die Variable mit der jeweils kleinsten F-Wahrscheinlichkeit in die Regression aufgenommen wird. Hierbei können auch Variablen, die bereits in die Regression integriert wurden, wieder ausgeschlossen werden, wenn das Signifikanzniveau ihres F-Wertes größer als 0,1 ist. Ist es nicht mehr möglich, neue Variablen hinzufügen oder auszuschließen, ist der Endpunkt des Verfahrens erreicht (vgl. HITTENBECK, 2009; CREMER, 2008; JACKE ET AL., 2006).

4 Ergebnisse zu den physikalischen Eigenschaften von Waldrestholzbündeln

4.1 Bündel-/ Waldrestholzanfall

Auf den insgesamt 33 untersuchten Flächen in acht Revieren kann die Produktion von 12449 Bündeln dokumentiert werden. Bei diesen analysierten Gebieten handelt es sich ausschließlich um Bestände, die der Windwurf Kyrill stark beeinträchtigte. Auf den herangezogenen Flächen wurden zwischen 25 und 477 Bündel pro Hektar bereitgestellt, damit beläuft sich das arithmetische Mittel auf 126 Bündel pro Hektar. Betrachtet man den Mittelwert, gewichtet nach der Flächengröße, resultiert daraus ein Wert von 105 Bündeln pro Hektar. Innerhalb der Reviere schwankt der Volumenanstieg ebenfalls stark: Im Revier Kindelsberg mit den meisten untersuchten Flächen liegt der geringste Anfall bei 62 Bündeln und der höchste bei 226 Bündeln pro Hektar. Bei den drei Flächen mit dem höchsten Volumenanstieg (292-474 St./ha) vollzog sich die Holzaufarbeitung maschinell, wobei das zu bündelnde Material soweit möglich mechanisch vorkonzentriert wurde. Der Zopfdurchmesser bemisst sich mit 12 Zentimetern ohne Rinde. Deutlich unterscheidet sich die Geländeneigung innerhalb der drei genannten Flächen von null bis 25 Grad Hangneigung sowie die Erntemenge pro Hektar (40-300 Efm/ha). Auf allen Flächen mit einem Volumenanstieg bis circa 50 Stück pro Hektar (7 Flächen mit zusammen 21,15 ha) wurde das Material nicht vorkonzentriert.

Tabelle 34: Übersicht über die Orte der durchgeführten flächenbezogenen Erhebungen.

Forstamt	Revier	Flächen [N]	Größe [ha]	Bündel [Stück]	Volumen- anstieg [St./ha]
Kurkölnisches Sauerland	Heinsberg	1	3,2	602	188
Siegen-Wittgenstein	Kindelsberg	13	30,4	3.732	123
	Eiserfeld	5	25,0	1.527	61
Oberes Sauerland	Freigrafschaft	1	3,0	639	214
	Küstelberg	4	15,4	2.734	177
Hochstift	Torfbruch	1	11,3	1.208	107
Gem. FoA Willebadessen	Herbram	4	12,2	951	78
	Willebadessen	4	18,1	1.056	58

Es zeichnet sich ein deutlicher linearer Zusammenhang zwischen der geernteten Rundholzmenge und der Anzahl der bereitgestellten Bündel je Hektar ab: Je mehr Rundholz eingeschlagen wird, desto weniger Restholz kann in Form von Bündeln entnommen werden. Dieser Zusammenhang erscheint zunächst widersprüchlich, da davon auszugehen ist, dass ein intensiver Holzeinschlag mit einer großen Ansammlung an Stammholz auch zu einem entsprechend hohen Angebot an Waldrestholz führt. Bis zu einem gewissen Grad trifft diese Annahme auch grundsätzlich zu: Das heißt, bei gleichen Bestandsparametern ist die anfallende Restholzmenge unter anderem von der Anzahl der geernteten Bäume positiv gerichtet

abhängig. Diesen Zusammenhang bestätigt auch LECHNER (2011), der einen positiv gerichteten, statistisch signifikanten Zusammenhang zwischen dem Kronenholzanfall und der Stammzahl des ausscheidenden Bestandes aufzeigen kann. Anders stellt sich die Situation jedoch beim Einzelbaumvolumen des ausscheidenden Bestandes dar. Mit zunehmendem Brusthöhendurchmesser minimiert sich die relative Menge an Kronenholz - insbesondere in Nadelholzbeständen. Starke und gut bestockte Bestände verfügen über einen hohen Anteil an Stamm-, verglichen mit dem Kronenholz (vgl. KRAMER ET AL., 1981). Hingegen entstehen in schwachen, stammzahlreichen Nadelholzbeständen deutlich größere Restholzmengen (LECHNER, 2004). Dieser Zusammenhang zeigt sich ebenfalls bei PATZAK (1984A) sowie GRAMMEL ET AL. (1980), die beide einen erheblichen Mehranfall von Waldrestholz in schwachen Fichtenbeständen (15-30 Jahre) mit geringen Mengen an Stammholz dokumentieren als bei älteren Beständen (vgl. SCHNEIDER ET AL., 1993). STERNER (2004) kommt in ihren Untersuchungen zu dem Schluss, dass eine positiv gerichtete Korrelation zwischen dem Industrieholzanfall und der Anzahl an produzierten Bündeln pro Hektar besteht. Eine statistische Überprüfung hinsichtlich der Signifikanz ihrer Daten steht aus.

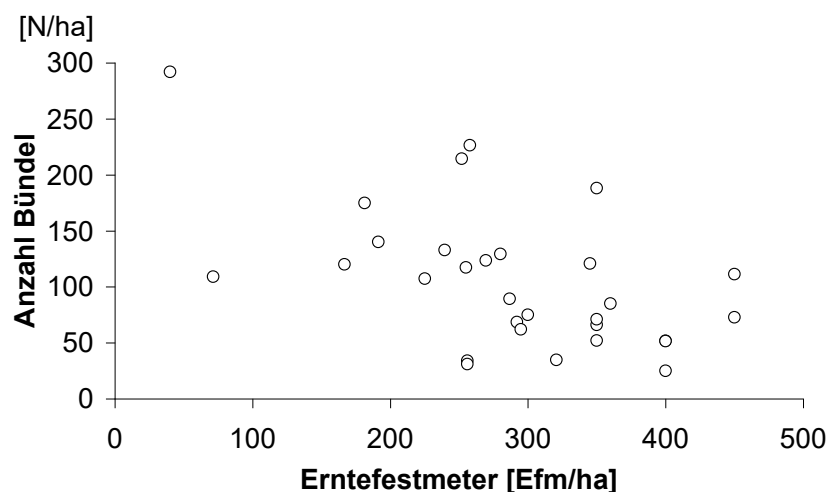


Abbildung 19: Der Einfluss der geernteten Rundholzmenge auf den Volumenanfall des geernteten Schlagabbaus im Streudiagramm.

4.2 Bündelmasse

Um die Masse von Bündeln zu ermitteln, können im Rahmen der getätigten Studien insgesamt 3043 Bündel fuhrenweise gewogen werden, bei denen es sich überwiegend um Material aus Fichtenschlagabraum, der bei der Holzaufarbeitung im Zuge der Kalamitätsnutzung nach dem Sturm Kyrill angefallen ist, handelt. Letzteres betrifft 2178 Bündel der Untersuchung. Infolgedessen ist der Umfang der Untersuchung zwar, speziell im Vergleich mit dem Datenvolumen anderer Forschungsarbeiten groß (s. Kapitel 4.1), allerdings ist die Streuung hinsichtlich der Baumartenzusammensetzung minimal.

1209 Bündel der genannten Menge stammen von einer 11,25 Hektar großen Fläche, wo auf nahezu ganzer Fläche die vorhandene Fichte durch den Sturm Kyrill geworfen wurde. Die

Aufarbeitung des Materials erfolgte im Anschluss an die Stammholzernte zwischen Februar und Mai 2007. Die Bündel wurden entlang einer Kreisstraße in Poltern aufgesetzt; die verbleibenden Fichtenbündel kommen ebenfalls aus der näheren Umgebung, einem Umkreis von circa sechs Kilometern. Die Abfuhr und damit die Masseermittlung erfolgte zeitversetzt, teilweise Monate später.

Bei der Variante ‚Überladewagen‘ (s. Tabelle 35) wurden die Objekte vor Ort zerkleinert und anschließend mit drei verschiedenen Überladewagen abgefahren. Die Fuhren wurden separat vermessen, die Anzahl der Bündel, die für eine Fuhre zerkleinert wurden, ermittelten die Schlepperfahrer. Die so gewonnenen Ergebnisse stimmen allerdings nicht mit der Vorabzählung der Gesamtmenge überein, weshalb eine fuhrenweise Angabe der transportierten Stückzahl in diesem Fall nicht möglich ist.

Tabelle 35: Ergebnis der fuhrenweisen Massebestimmung von Bündeln aus Fichtenschlagabraum nach Windwurf.

	Anzahl			Frischmasse je Fuhre			
	Touren [N]	Bündel [St.]	[St./N]	\bar{x} [kg/N]	\bar{x} [kg/St.]	MIN [kg/St.]	MAX [kg/St.]
K1	3	132	44	14.455	328	320	336
K2	1	53	53	23.000	434	434	434
K3	19	970	51	14.940	295	237	343
Container	11	508	46	15.980	343	336	359
Überlad.	19 (1)	640	34	10.396	309	---	---

Die größte Streuung hinsichtlich der durchschnittlichen Bündelmasse weist die Variante ‚K3‘ auf (s. Tabelle 35): Die Standardabweichung über alle 19 Transporte beläuft sich bei diesem Exempel auf circa 38 Kilogramm je Bündel. Ein Ergebnis, das zunächst nicht verwundert, da K3 als Einziger in zwei unterschiedlichen Revieren lud. Zwar liegen diese beiden Reviere nur einige Kilometer voneinander entfernt im Eggegebirge, allerdings tritt ein deutlicher Unterschied der Fuhrenmittelwerte hinsichtlich der Bündelmasse, differenziert nach den beiden Revieren, zu Tage. Die statistische Überprüfung mittels eines Mann-Whitney-U-Tests (vgl. Kapitel 3.7.2) bestätigt einen statistisch signifikanten Unterschied der Stichprobenmittelwerte (s. Tabelle 36).

Tabelle 36: Anzahl der Touren und Bündel sowie Mittelwert und Standardabweichung der fuhrenweise ermittelten Bündelmasse in zwei Revieren. Zum Vergleich der Mittelwerte erfolgt ein Mann-Whitney-U-Test.

	Σ Touren [N]	Σ Bündel [St.]	\bar{x} Bündelmasse [kg/St.]	s
Revier 1	8	389	318	19,6
Revier 2	12	581	280	40,6
		U-Wert	Z	p
Revier 1 vs. Revier 2		21,000	2,045	0,041*

* statistisch signifikant auf dem Niveau $\alpha = 0,05$

Tabelle 37 zeigt noch einmal die wesentlichen Parameter der beiden Reviere gemäß der Hiebsprotokolle (vgl. Kapitel 5.3.1). Augenfällig ist hierbei, dass sich die Werte stark ähneln, so dass hier keine signifikante Ursache für die unterschiedlichen Bündelmassen ausgemacht werden kann. Ein eindeutiger Unterschied zwischen den beiden Revieren besteht hingegen darin, dass in Revier 2 mit dem Harvester beziehungsweise in Revier 1 manuell das Stammholz aufgearbeitet wurde: Im letztgenannten Fall bleiben die Baumwipfel nach dem Abtrennen unberührt auf der Fläche zurück, während der Harvester technisch bedingt die Kronen teilweise entastet. In Revier 2 waren eine Überfahung und partielle weitere Einkürzungen der Kronen nicht zu verhindern, zudem ist aufgrund der dabei abfallenden Äste und Holzstücke zu vermuten, dass die Dichte des Materials und damit die Masse der Bündel niedriger ausfällt als bei der manuellen Holzaufarbeitung. Eine statistische Überprüfung verbietet sich leider durch mangelnde Informationen.

Tabelle 37: Durchschnittliche Flächengröße, Zopfdurchmesser und Holzanfall in beiden Revieren.

	\bar{x} Fläche [ha/Fläche]	\bar{x} Zopf [cm]	\bar{x} Holzanfall [Efm/ha] [St./ha]
Revier 1	4,5	9	375 57
Revier 2	3,3	8	400 55

Neben den Bündeln aus Fichtenschlagabraum liegt auch eine geringe Anzahl von Wiegeproben anderer Baumarten vor. Beispielsweise konnte man das Gewicht einer Lkw-Ladung mit gemischtem Laubholz, das bei einer Pflegemaßnahme entlang der Autobahn anfiel (Straßenbegleitgrün / SBG), dokumentieren (s. Tabelle 38), zudem ist der Rückgriff auf die Abrechnungen eines Spanplattenwerkes möglich. Für die Anlieferung von Bündeln aus Buchen- und Erlenschlagabraum liegen Informationen über die Anzahl der gelieferten Bündel und die Trockenmasse²¹ der Lieferungen vor.

²¹ Trockenmasse (TM) o. Masse der Trockensubstanz (auch Atro-Masse) ist der Bestandteil einer Substanz, der nach Abzug der Masse des enthaltenen Wassers verbleibt.

Tabelle 38: Ergebnis der fuhrenweisen Masseermittlung von Laubholzbündeln (SBK = Straßenbegleitgrün).

	Touren [N]	Anzahl Bündel [St.]	\bar{x} Bündelmasse je Fuhre [kg/N]
SBG (K4)	1	48	48
Buche (K1)	4	187	47
Erle (K1)	13	630	48

Die alleinige Kenntnis über die Frischmasse der Bündel ist nicht ausreichend, um eine fundierte Auskunft über die im Bündel befindliche Masse des Holzes ohne Wasser und damit den möglichen Energieinhalt eines Bündels zu treffen. Zu diesem Zweck ist die Bestimmung des Wassergehaltes zentral. Die Herausforderung besteht darin, die zeitliche Übereinstimmung der Ermittlung von Masse und Wassergehalt auf der einen und der tatsächlichen Kongruenz des Probeguts von Masse- und Wassergehaltsbestimmung auf der anderen Seite zu gewährleisten. Beides kann für nachfolgende Ergebnisse nicht vollständig sichergestellt werden, wodurch die Aussagekraft der Ergebnisse fragwürdig wird und lediglich die Verwendung als Näherungswert in Betracht kommt. Genauere Ergebnisse liefert hier NEFF (2007), der allerdings, insbesondere bei der Massebestimmung, einen deutlich geringeren Stichprobenumfang für seine Hypothesenuntersuchung heranzieht.

Die in Tabelle 39 angegebene Trockenmasse der Bündel ergibt sich durch Multiplikation des TM-Gehalts der Proben der jeweiligen Transportalternative mit den in Tabelle 35 dargestellten Mittelwerten der Bündelfrischmasse. Waren bei der Masseermittlung der frischen Bündel noch Differenzen von mehr als 100 Kilogramm pro Bündel zwischen den Mittelwerten der Transportalternativen ersichtlich (vgl. K1 und K2, Tabelle 35), macht die Gegenüberstellung der Trockenmassen deutlich, dass der Unterschied im frischen Zustand im Wesentlichen auf differente Wassergehalte zurückzuführen ist. Die benannte Größe eines Bündels weicht demnach lediglich um maximal 53 Kilogramm pro Bündel zwischen den verschiedenen Proben ab (vgl. Container und Überladewagen, Tabelle 39).

Tabelle 39: Ergebnis der Masse- und Wassergehaltsbestimmung (WG) an verschiedenen Proben (TM-Gehalt = 100 – WG).

	Datum	\bar{x} Masse [kg/St.]	Datum	\bar{x} TM-Gehalt [% TM]	\bar{x} Atro-Masse [kg TM/St.]
K1	Sep. 07	328	Feb. 08	61	200
K2	Jan. 08	434	Feb. 08	48	208
K3	Feb. 08	295	Feb. 08	62	183
Container	Feb. 08	343	Feb. 08	64	220
Überlad.	Nov. 07	309	Nov. 07	54	167

In der Literatur zum Einsatz von Waldrestholzbündeln wird in nahezu allen vorliegenden Untersuchungen in irgendeiner Form die Maße der produzierten Bündel ermittelt. Dazu werden Länge und Durchmesser bestimmt, so dass infolgedessen Aussagen über das Volumen getroffen werden können. Bei vielen Studien wird zwar darüber hinaus die Masse der Bündel bestimmt, eine Feuchte- oder Wassergehaltsmessung findet jedoch nicht statt, wodurch eine Ermittlung des TS-Gehalts gleichsam entfällt.

Insgesamt können 70 Studien zur Feststellung der Bündelmasse herangezogen werden (vgl. Tabelle 2.1-8 im Anhang), was einem Umfang von über 114 Tausend Bündeln entspricht. In den meisten Fällen wird allerdings auf eine Wiegung jedes einzelnen Bündels verzichtet und lediglich Stichprobenergebnisse oder Mittelwerte veröffentlicht.

Tabelle 40: Die Masseangaben von Bündeln in der Literatur.

Baumart	Fälle [N]	\bar{x} [kg/St.]	MIN [kg/St.]	MAX [kg/St.]	s [kg/St.]
Laubholz	28	422	338	501	48
Nadelholz	38	412	295	696	81
Gemischt	3	469			
k. A.	1	500			
Gesamt	114.451 St.	420 kg/St.			

Insbesondere beim Nadelholz ist eine große Spreizung der Werte erkennbar, was die hohe Standardabweichung von 81 Kilogramm pro Stück bestätigt (vgl. Tabelle 40). Ein großer Unsicherheitsfaktor bei der Abschätzung der mittleren Bündelmasse stellt der Wassergehalt dar, denn abhängig davon, ob das Material direkt im Anschluss an die Holzernte oder nach einer Abtrocknungsphase aufgearbeitet wird, kann der Wassergehalt zwischen circa 30 und 55 Prozent variieren (LÖFFLER, 2007; NEFF, 2007). Diese wesentliche Angabe findet sich allerdings nur in wenigen Veröffentlichungen (N = 13). Dem geringen Stichprobenumfang geschuldet, muss die Aussagekraft der Ergebnisse eingeschränkt bleiben. Mit durchschnittlich circa 200 Kilogramm Trockenmasse pro Bündel im Nadelholz (N = 7) kann die Umrechnung von Bündel in eine Tonne Trockenmasse vereinfacht mit dem Faktor fünf durchgeführt werden. Der mittlere Wassergehalt bei den Laubholzbündeln beläuft sich auf 47,8 Prozent (N = 4) und liegt damit um circa 5,5 Prozent niedriger als beim Nadelholz.

4.3 Natürliches Trockenverhalten von Bündeln

Von besonderem Interesse ist auch das Trockenverhalten von Restholzbündeln, das in einigen Studien als ein besonders gutes beschrieben wird (KÄRHÄ ET AL., 2006; REUTER, 2005; HOYNE ET AL., 2001). Demnach ist eine schnelle und nahezu verlustfreie Abtrocknung des Materials zu erwarten. Diese Annahmen decken sich jedoch nicht vollständig mit anderen Forschungsstudien und den eigenen Beobachtungen. Nach KANZIAN (2005) konnte keine charakteristische Abtrocknung von Bündeln aus Fichten- und Kiefernschlagabraum im Zeitraum Januar bis Oktober beobachtet werden, zudem machte er keinen signifikanten Unter-

schied zwischen einer Freilandlagerung und einer unter einem Bestandesschirm aus. Lediglich die Abdeckung mit Spezialpapier trug zu einer deutlichen Abtrocknung des Materials bei (vgl. EBERHARDINGER, 2011).

NEFF (2007) stellte ebenfalls umfangreiche Untersuchungen zum Lagerverhalten von Restholz Bündeln an und kam zu dem Schluss, dass Bündel aus frischem Fichtenschlagabraum einen hohen Anfangswassergehalt aufweisen (ca. 65 %), der allerdings im Laufe von vier Monaten ohne Abdeckung auf etwa 40 Prozent absinkt. Sowohl NEFF (2007) als auch KANZIAN (2005) sehen einen früh einsetzenden Verrottungsprozess bei gebündeltem Fichtenschlagabraum, der die Struktur der Bündel beeinträchtigt. Diese Resultate decken sich mit denen der vorliegenden Untersuchung. Auch nach JIRJIS (2003) ist bei der Trocknung von verdichtetem Schlagabraum mit starker Verpilzung zu rechnen.

Ein grundsätzlich abweichendes Ergebnis zeigt sich bei Bündeln aus Laubholzschlagabraum: Hier sind durchweg gute Abtrocknungsverläufe festzustellen. NEFF (2007) dokumentierte bei frischen Bündeln aus Eichenkronen und -ästen eine Abtrocknung auf teilweise unter 20 Prozent Wassergehalt innerhalb von vier Monaten (Mrz. - Jun.). Vergleichbare Werte mit Buchen- und Erlenschlagabraum erzielten auch die Lieferungen an die Spanplattenhersteller im Rahmen der Transportversuche dieser Arbeit. So sank der Wassergehalt der im Februar eingeschlagenen Buchenkronen auf circa 30 Prozent innerhalb von drei Monaten (Feb. - Mai).

4.4 Materialanalyse von zerkleinerten Bündeln

Die Geometrie und die Gleichmäßigkeit der Hackschnitzel stellt ein wesentliches Qualitätskriterium für die Güte des zerkleinerten Waldrestholzes dar. Die sich daraus ergebenden Qualitätsstandards sorgen für eine Prozessstabilität beim Einsatz der Hackschnitzel als Brenn- oder Rohstoff für die Energie und Holzwirtschaft (VAP, 2009). Aus schlechten Brennstoffeigenschaften können Störungen an den Produktionsanlagen (NEFF, 2007; PAULITSCH, 1977) oder Kostensteigerung in der Materialaufbereitung resultieren. Zu große, nicht ausreichend zerkleinerte Hackschnitzel verstopfen nicht selten die Austragungsaggregate oder sorgen bei der Verbrennung für ein ungleichmäßiges, schlechtes Abbrennverhalten. Gleichwohl unbrauchbar ist zu kleines Hackgut, da sich der Anteil unerwünschter, mineralischer Fremdstoffe in dieser Fraktion überdurchschnittlich hoch zeigt. Zudem ist bei der Verbrennung eine Verschlechterung der Brenneigenschaften denkbar, da das Hackgut bei einem zu hohen Grad an Feinanteil nicht mehr durchströmungsfähig ist, das Feuer ersticken kann (EBERT ET AL., 2005) oder das Material unverbrannt durch das Feuerrost in die Asche fällt beziehungsweise in der Staubabscheidung der Rauchgasreinigung landet. Des Weiteren besteht bei einem zu hohen Anteil von Feinmaterial die Gefahr, dass es zu Anbackungen am Bunker- oder Siloboden kommt, wodurch ebenfalls der Materialaustrag behindert wird (NEFF, 2007).

Die Art der Zerkleinerung und die Bedienung des Zerkleinerers bestimmt im Wesentlichen die Geometrie der Hackschnitzel (vgl. Kapitel 5.3.6). Neben der grundsätzlichen Arbeitsweise der Maschinen spielen auch Feinheiten bei der Anwendung, etwa die Einstellung der Messer oder die Einzugs geschwindigkeit, eine nicht zu unterschätzende Rolle: Zu stumpfe Messer an

den Hackern ziehen einen größeren Anteil an Feinmaterial im Hackgut nach sich (NEMESTÓTHY, 2012B).

Im Rahmen der stationären Zerkleinerung konnten 55 Holzproben hinsichtlich der Korngrößenverteilung untersucht werden, die sich mittels Siebung in sechs unterschiedliche Fraktionen aufteilen lassen. Dadurch ist eine Einteilung der Holzproben in unterschiedliche Größenklassen gemäß der europäischen Norm CEN/TS 14961 (2005) möglich. Die Mittelwerte der relativen Anteile einer Holzprobe an den jeweiligen Fraktionen stellt die Abbildung 35 dar. Es zeigt sich, dass sich die Proben aus der Zerkleinerung mit dem Trommelhacker Jenz HEM 560 im Mittel der Klasse P16 zuordnen lassen, da sie mit 80 Prozent des Materials mehrheitlich zwischen 3,15 bis 16 Millimeter groß sind. Die Proben der Langsamläufer (Crambo und VB 750) hingegen sind der Klasse P100 zuzuschlagen, wobei Bemessungen zwischen 3,15 bis 100 Millimeter dominieren.

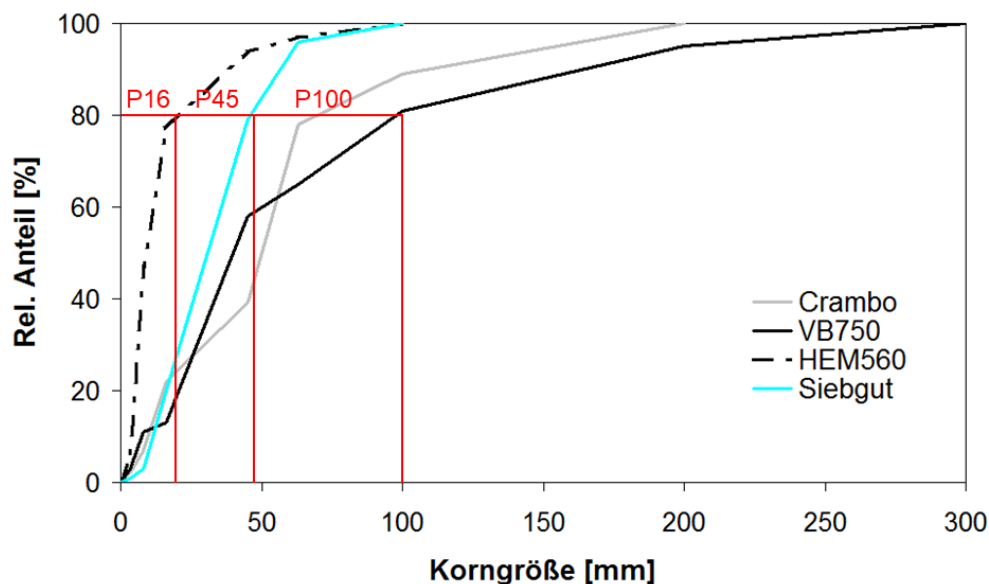


Abbildung 35: Korngrößenverteilung der Hackgutproben aus den unterschiedlichen Zerkleinerern.

Um zu prüfen, ob sich die Daten auch statistisch signifikant unterscheiden, wird mit Hilfe eines Kruskal-Wallis-Tests eine Statistik erstellt. Zu diesem Zweck werden zunächst die relativen Anteile der Siebklassen 3,15 bis 8 und 8 bis 16 Millimeter der jeweiligen Zerkleinerer addiert und die sich daraus ergebenden Datenreihen miteinander verglichen. Diese differieren bei einer Fehlerwahrscheinlichkeit von weniger als fünf Prozent signifikant. Stellt man einen Vergleich innerhalb der Größenklasse P100 an, unterscheiden sich die addierten relativen Häufigkeiten der Klassen 3,15 bis 100 Millimeter ebenfalls auf bedeutende Weise (s. Tabelle 41). Allerdings offenbart sich im direkten Vergleich ein undifferenziertes Bild: Zwar ist ein signifikanter Unterschied zwischen der Korngrößenverteilung von dem zerkleinerten Holz des VB 750 zu dem des Crambo auszumachen, jedoch taucht dieser eindeutige Unterschied zwischen dem Hackgut aus dem Crambo und dem Siebgut nicht auf. Dieses Ergebnis scheint zunächst widersprüchlich und stellt die Wirkungsweise der Sternsieberanlage in Frage. Es muss jedoch berücksichtigt werden, dass sich die Siebanlage insbesondere auf die Feinfrak-

tion (<10 mm) sowie die Grobfraction (>80 mm) niederschlägt und diese Korngrößenbereiche in der Größenklasse P100 (3,15-100 mm) entsprechend kaum wiedergegeben werden. Fokussiert man daher auf die Bereiche null bis acht sowie 63 bis 200 Millimeter ist ein deutlich aussagekräftiger Unterschied zwischen dem Hackgut des Crambos und der Siebanlage nicht von der Hand zu weisen.

Tabelle 41: Übersicht über die Tests zur Überprüfung, ob sich die Korngrößenverteilungen der Zerkleinerer in den angegebenen Hackgut-Größenklassen signifikant unterscheiden.

Untersuchung	Größenklasse	Test	Wert
Alle	3,15 – 16 mm	Kruskal-Wallis	H = 39,475 (*)
Alle	3,15 – 100 mm	Kruskal-Wallis	H = 30,299 (*)
VB750 vs. Crambo	3,15 – 100 mm	Mann-Whitney	U = 33 (*)
Crambo vs. Siebgut	3,15 – 100 mm	Mann-Whitney	U = 23
Crambo vs. Siebgut	0 – 8 mm	Mann-Whitney	U = 14 (*)
Crambo vs. Siebgut	63 – 200 mm	Mann-Whitney	U = 09 (*)

* Die Korrelation ist auf dem Niveau von $\alpha = 0,05$ signifikant.

Der Einsatz einer Siebanlage erfolgt, um unerwünschte Korngrößen aus dem Hackgut zu entfernen, wobei die ausgesonderten Feinanteile und Grobkörner in der Regel lediglich zu einem niedrigeren, unwirtschaftlichen Preis als die Hauptware veräußert werden können oder sogar vollständig entsorgt werden müssen. Neben den Anforderungen, die an das Hackgut gestellt werden, gelten für die Aufteilungen der Fraktionen das Ausgangsmaterial, die Behandlung von zerkleinertem und unzerkleinertem Holz sowie die verwendete Zerkleinerungstechnik als Einflussfaktoren (NEMESTÓTHY, 2012A; SPINELLI ET AL., 2005). Durch den Einsatz der Sternsiebanlage im Rahmen der Feldversuche zur stationären Holzaufbereitung (s. Kapitel 5.3.7) können Feinanteile und Übergrößen aus dem behandelten Material separiert werden. Die Förderbänder geben anschließend die drei Fraktionen Siebgut, Unter- und Überkorn getrennt aus. Im Rahmen der Versuche wird sowohl die Mengenaufteilung zwischen den drei Fraktionen als auch eine Korngrößenverteilung durch Siebung von Proben innerhalb der einzelnen Fraktionen durchgeführt.

Die Mengenaufteilung des Materials dokumentiert, dass der Feinanteil bei der Zerkleinerung der Nadelholzbündel aus Schlagabraum etwa 14 Prozent vom Gesamtvolumens des Hackguts ausmacht (s. Abbildung 36). NEMESTÓTHY (2012B) konstatiert, dass mit zunehmendem Anteil von grünem Astmaterial auch der Feinkornanteil bei der Zerkleinerung steigt. So ermittelt er in diesem Zusammenhang einen Feinkornanteil von bis zu 30 Prozent bei Fichtenastmaterial. Bei der Hackung von Laubstammholz fällt ein Feingutanteil im Hackgut von etwa zwei bis 13 Prozent je nach Hackaggregat an. Bei Neff (2007) findet sich desgleichen ein Ergebnis der Hackgutuntersuchung von zerkleinerten Bündeln aus unterschiedlichen Baumarten (Laub- und Nadelholz): Bei der Siebung mit einem Sternsieb können hierbei 26,7 Prozent des Aufgabeguts der Fehlkornfraktion (< 10 mm) zugeordnet werden.

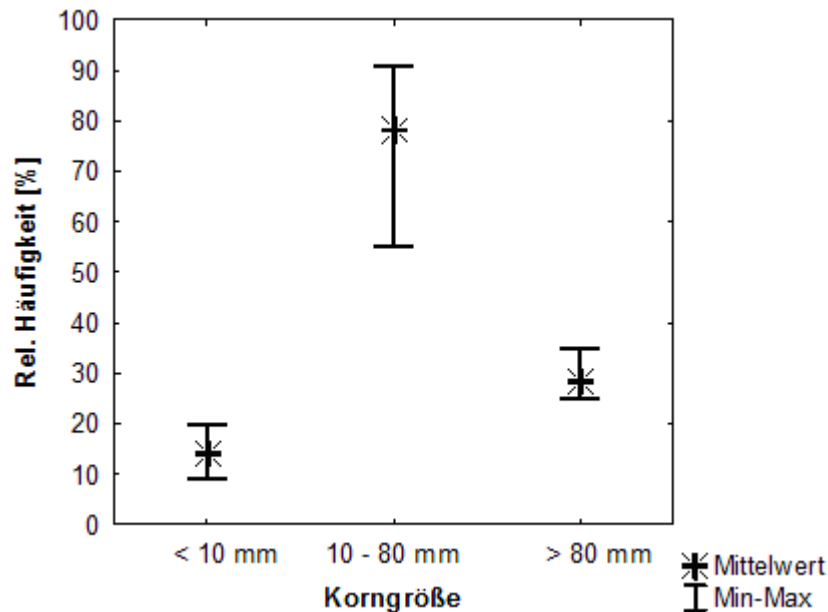


Abbildung 36: Anteil von Feinkorn (<10 mm; N = 11); Mittelfraktion (10-80 mm; N = 11) und Grobgut (>80 mm; N = 3) der Sternsieberanlage Komptech Multistar M3 am Gesamtvolumen der Proben.

Im Gegensatz zu den vorgenannten Expertisen beträgt der im Rahmen der vorliegenden Arbeit ermittelte Anteil der entscheidenden Mittelfraktion etwa 80 Prozent des Gesamtvolumens der Proben. Allerdings ist aufgrund der umfangreichen Einflussgrößen auf die Geometrie der Hackschnitzel der direkte Vergleich untersagt, so dass keinerlei direkte Rückschlüsse auf die Qualität des Ursprungsmaterials gelingen. NEMESTÓTHY (2012B) stellt in seiner Arbeit auch einen Zusammenhang zwischen dem Wassergehalt des Ausgangsmaterials und dem Anteil von Fehlkorn im Hackgut her: Beim Nadelholz sieht er den Unterkornanteil mit zunehmendem Flüssigkeitsgehalt steigen; auch hier fehlt die statistische Verifizierung der Daten.

Die Analyse von Siebproben macht deutlich, dass die Korngrößenverteilung der drei Fraktionen erwartungsgemäß indifferent ausfällt. Als Referenzgröße sind die Werte der ungesiebten Proben aus demselben Zerkleinerer aufgeführt. Die Siebanlage war während der Versuche so eingestellt, dass die Kantenlänge der Holzstücke im fertigen Siebgut zwischen 10 und 80 Millimeter betragen soll. Abbildung 37 zeigt den Mittelwert der Masse einer Probe in der jeweiligen Größenklasse, ausgegeben als relativer Anteil.

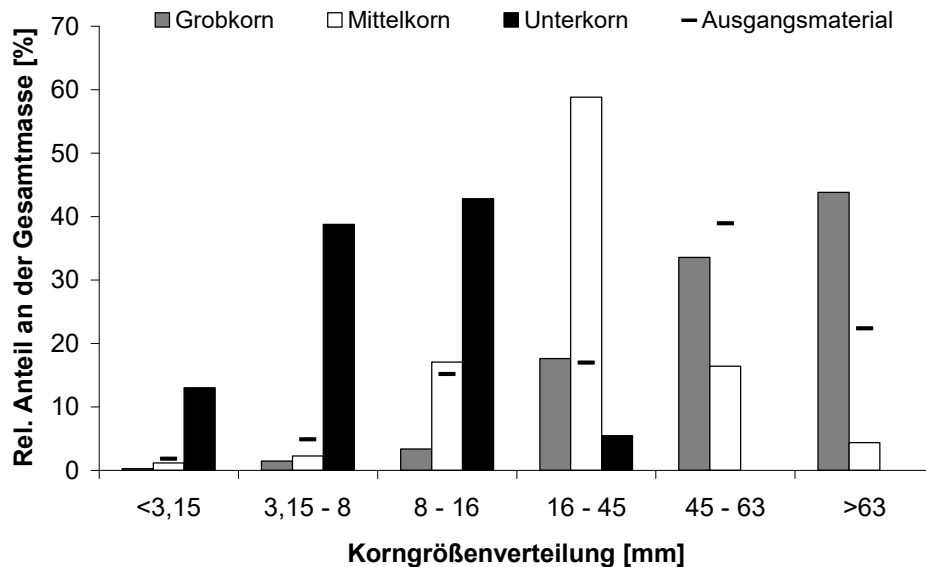


Abbildung 37: Relativer Anteil der unterschiedlichen Korngrößenklassen an der Gesamtmasse der Hackgutprobe (N = 62).

Die Analyse des Unterkorns verdeutlicht, dass der relativ größte Teil der Proben der Größenklasse acht bis 16 Millimeter zuzuschreiben ist, was vermuten lässt, dass die Siebanlage nicht wie gewünscht gearbeitet hat. Dieser Eindruck manifestierte sich bereits bei der Sichtprobe, denn im Unterkorn zeichneten sich deutliche Holzstücke ab. Durch eine Erhöhung der Rotationsgeschwindigkeit der Wellen im unteren Siebdeck ist die Korngröße im Unterkorn reduzierbar, jedoch können die Siebproben kein vollständiges Bild liefern, da sich unter anderem die Klassengrenzen vom Unterkorn der Sternsieberanlage (0-10 mm) und der Siebschalen zur Beprobung (3,15-8 mm) unterscheiden. Um die gewünschten Bemessungen einzuhalten, sind daher eine regelmäßige Kontrolle und gegebenenfalls Nachjustierung der Sternsieberanlage notwendig.

Während das ungesiebte Material (Ausgangsmaterial) den größten Massenanteil in der Klasse 45 bis 63 Millimeter aufweist, messen fast 60 Prozent der Holzstücke im Siebgut (Mittelkorn) 16 bis 45 Millimeter. Die regelmäßige Größenverteilung im Mittelkorn und der geringe Anteil der Stücke, die größer als 63 Millimeter sind, verdeutlichen die gute Absiebung der Übergrößen. Von den Holzstücken größer 63 Millimeter beim Mittelkorn waren lediglich ganz wenige Teile (ca. 1 %) zwischen 100 bis 200 Millimeter, kein Holzstück in den Proben maß dabei mehr als 200 Millimeter.

NEFF stellte im Jahr 2007 detaillierte Untersuchungen zu gesiebten Holzhackschnitzeln an, wobei ebenfalls ein Sternsieb der Firma Komptech zum Einsatz kam, allerdings das Modell L3, was sich, verglichen mit dem M3, durch eine größere Durchsatzleistung auszeichnet. Neff (2007) testete die Siebanlage mit Landschaftspflegeholz, das entweder durch einen Trommelhacker oder einen Schredder zerkleinert wurde. Die Siebanlage war dabei so eingestellt, dass sich das Siebgut in der Klasse 25 bis 70 Millimeter befand.

Insbesondere die Größenverteilung im Unterkorn der gehackten Holzhackschnitzel zeigt offensichtliche Ähnlichkeiten mit den Ergebnissen dieser Untersuchung. Ähnlich verhält es

sich bei der geschredderten Probe, dessen Größenverteilung im Unterkorn tendenziell vergleichbar ist. Jedoch kehrte sich in diesem Fall die Relation der Klassen 3,15 bis acht beziehungsweise acht bis 16 Millimeter um. Hinsichtlich des Mittelkorns ist eine ähnliche Verteilung der Größen feststellbar, sowohl beim Ursprungsmaterial aus dem Hacker als auch beim Schredder (beide aus NEFF, 2007) und beim Zerspaner, wie er in dieser Studie verwendet wurde. Deutlich wird in diesem Kontext das gute Absiebverhalten der Sternsiebanlage, unabhängig vom Inputmaterial. Die Ursachen für offensichtliche Abweichungen sind gegebenenfalls im Eingabematerial sowie im Überkorn auszumachen, was den Einfluss der Zerkleinerungstechnik auf die Qualität des zerkleinerten Holzes hinsichtlich dessen Geometrie verdeutlicht. Durch den Hacker wurde ein Hackgut mit einem Schwerpunkt in der Größenklasse 3,15 bis 16 Millimeter (ca. 72 %) erzeugt, wohingegen das Schreddermaterial vorwiegend in den Klassen 3,15 bis 45 Millimeter (ca. 83 %) anzusiedeln ist (NEFF, 2007). Beim Zerspaner (Crambo) liegen etwa 93 Prozent der mittleren Probenmasse in den Klassen acht bis 200 Millimeter vor, wobei der größte Teil (38,9 %) der Klasse 45 bis 63 Millimeter zuzuschlagen ist. Die Maschine weist des Weiteren mit 1,8 Prozent den geringsten Anteil an Feinstmaterial (<3,15 mm) auf, während der Hacker (5,6 %) und der Schredder (6,6 %) höhere Werte erreichen (Neff, 2007).

5 Schritte zu einem Modell zur Durchführung eines Bereitstellungskettenvergleichs

5.1 Eingangsdaten

Der Vergleich der zwei unterschiedlichen Ketten zur Bereitstellung von Waldrestholz soll eine Entscheidungshilfe bei der Auswahl der wirtschaftlichsten Variante geben. Dabei wird zwischen dem Ansatz der mobilen und der stationären Zerkleinerung unterschieden (s. Kapitel 2.3). Anhand der im Folgenden erläuterten Vorgehensweise kann man die Produktivität und die Kosten der spezifischen Arbeitsverfahren, unter Berücksichtigung der individuellen Eingangsparameter des jeweiligen Praxiseinsatzes, abschätzen. Tabelle 42 verschafft dem Rezipienten einen Überblick über die 17 Eingangsdaten, die bei der Berechnung der Verfahrenskosten berücksichtigt werden können.

Tabelle 42: Bereitstellungskettenvergleich: Eingangsdaten für den kalkulierten Einsatz.

A. Eingangsdaten – Einsatz			Bemerkung
1.		Menge	<i>SRm</i>
2.	Restholz	Baumart	<i>Laub / Nadel</i>
3.		Vortrocknung am Waldweg	<i>Ja / Nein</i>
4.		Tats. mittlere Ruckeentfernung	<i>(100 - 700; >700) m</i>
5.		Geländeneigung	<i>(1-4) Stufen</i>
6.	Bestand	Erntevorbereitung	<i>(0; 1) Dummy</i>
7.		Rundholzanfall	<i>(40-450) Efm</i>
8.		Zopfdurchmesser	<i>(7-15) cm</i>
9.	Restholz-	Trägerfahrzeug	<i>Kombim. / Forwarder</i>
10.	bündler	Einsatzgebiet	<i>Windwurf / Normal</i>
11.	Mobilhacker, jährliche Einsatzdauer		<i>(500-2000) BS/a</i>
12.	Hackgut-transport	Platzverhältnisse am Hackort	<i>Gut / Mittel / Schlecht</i>
13.		Anzahl Container-Lkw	<i>N</i>
14.		Transport mit Anhänger	<i>Ja / Nein</i>
15.	Einfache Transportentfernung Polterplatz – Werk		<i>(7-396) km</i>
16.	Stationäre Zerkleinerung, Antrieb		<i>Diesel / Elektro</i>
17.	Hackgut	Siebung Mobilhacker	<i>Ja / Nein</i>
		Siebung stationärer Zerkleinerer	<i>Ja / Nein</i>

Die Spannweite der Angaben ist partiell eingeschränkt, um die Gültigkeit der einzelnen Produktivitätsmodelle zu gewährleisten, dabei stellt Tabelle 42 die jeweiligen Gültigkeitsbereiche in Klammern dar.

Eine wesentliche Voraussetzung für die Planung der Bereitstellung von Waldrestholz ist die korrekte Abschätzung der anfallenden Holzmengen. Der Holzanfall entscheidet unter anderem darüber, ob, zu welchem Preis und mit welchen Betriebsmitteln die Nutzung des Schlagabbaus bei einer Holzerntemaßnahme möglich ist. Er ist Voraussetzung für die Disposition der Transportkapazitäten und für die Auswahl der geeigneten Arbeitssysteme. Doch gerade die detaillierte Ermittlung der Menge an Schlagabraum bei Holzerntemaßnahmen bereitet in

der Praxis Schwierigkeiten. Dabei ist es naheliegend den Anfall an Schlagabraum im Verhältnis zur anfallenden Rundholzmenge zu setzen. Doch wie in Kapitel 4.1 gezeigt, treten hierbei große Variationen auf. Dies wird bestätigt durch andere Autoren die, bezogen auf den Rundholzanfall, die Energieholzmengen bei der Laubholznutzung auf sechs bis 26 Prozent (KANZIAN ET AL., 2006A) und im Nadelholz auf 10 bis 15 Prozent (KANZIAN, 2005) schätzen. HAKKILA (2004) kommt zu dem Ergebnis, dass das Waldrestholz, je nachdem ob es im Zuge einer Durchforstung oder einer Endnutzung entnommen werden soll, eine Menge von vier bis 30 Prozent der Rundholzmenge ausmachen kann. Er bezieht seine Ergebnisse auf Untersuchungen von Fichte und Kiefer in Finnland. Auch KRAMER ET AL. (1981) sehen einen starken negativen Zusammenhang zwischen Reisiganfall und zunehmender Altersklasse der Bäume.

Zur Ermittlung der Gesamtkosten wird die jeweilige Bereitstellungskette in ihre einzelnen Systeme unterteilt (s. Tabelle 32; Kapitel 3.6), wobei sich die Kosten akkumulierend aus den Stückkosten und der Produktivität der einzelnen Abschnitte ergeben. Die Produktivität errechnet sich anhand der Resultate der diversen Forschungsvorhaben dieser Arbeit (s. Kapitel 5.2 u. 5.3) und den Eingangsdaten der Kostenkalkulation (s. Tabelle 22 u. Tabelle 23).

5.2 Bereitstellungskette Zerkleinerung im Wald

5.2.1 Teilprozess Rücken von Schlagabraum

Im Rahmen einer Literaturanalyse können 33 Fälle zur Herleitung der Einflussvariablen auf die Produktivität beim Rücken von Schlagabraum herangezogen werden. Die durchschnittliche Produktivität beim Rücken schwankt dabei in einem Bereich von 4,5 bis 63,4 Schüttraummetern je MAS (s. Tabelle 43).

Tabelle 43: Arithmetisches Mittel, Minimal- und Maximalwert sowie Median der Produktivität beim Rücken von Schlagabraum aus der Literatur (N = 33).

	\bar{x}	Min.	Max.	Median
TAP [SRm/MAS]	20,0	4,5	63,4	15,6

Im Rahmen der Literaturanalyse werden diverse Einflussgrößen auf die Produktivität beim Rücken von Schlagabraum identifiziert. Die häufigsten verwendeten Parameter sind die Flächengröße je Hieb (N = 31), die mittlere Ruckeentfernung (N = 29) sowie der durchschnittliche Stammholz- (N = 25) und Restholzanfall (N = 28). Der BHD des ausscheidenden Bestandes wird in 23 Fällen erwähnt, während alle übrigen Einflussvariablen gar nicht oder in weniger als 50 Prozent der Vorkommnisse genannt werden und damit für eine Analyse im Rahmen einer Modellabschätzung unbrauchbar sind. Ein signifikanter Zusammenhang zwischen der Produktivität und den in der Literatur genannten charakteristischen Relevanzgrößen kann im Rahmen einer Korrelationsanalyse nicht nachgewiesen werden. Lediglich zwischen der Flächengröße und der Produktivität sowie dem Brusthöhendurchmesser des ausscheidenden Bestandes und der Produktivität ist ein enger Zusammenhang gegeben (vgl. Tabelle 44). Aus diesen beiden Einflussgrößen lässt sich mit Hilfe der multiplen schrittweisen

Regression ein Modell entwickeln, das circa 44 Prozent der Gesamtvariabilität erklärt. Das Modell erweist sich als signifikant auf dem Niveau von 0,05 (Details s. Tabelle 2.1-15 ff im Anhang).

Tabelle 44: Korrelationskoeffizienten (nach PEARSON) zwischen der Produktivität [SRm/MAS] beim Rücken von losem Schlagabraum und einzelnen untersuchten Parametern.

Untersuchung	Cor (r)	N	P
Restholzanfall [SRm/ha]	-0,063	28	0,752
Mittl. Kronenvol. [SRm/St.]	0,123	14	0,674
Stammholzanfall [Efm/ha]	0,100	25	0,634
Mittlere Rückeentfernung [m]	-0,152	27	0,448
Flächengröße [ha]	-0,433	31	0,015 (*)
Mittlerer BHD [cm]	0,580	23	0,004 (**)

* Die Korrelation ist auf dem Niveau von 0,05 (** 0,01) signifikant.

Auf den ersten Blick ist nicht erklärlich, inwiefern die Flächengröße und der Durchmesser der ausscheidenden Bäume auf den Transport des Schlagabraums einen Einfluss ausüben, während die zu erwartenden Zusammenhänge wie das Stückvolumen und die Rückeentfernung keine Korrelation aufweisen. Diese beiden Einflussgrößen stehen als produktivitätsbeeinflussende Variablen jedoch vermutlich hinter der Flächengröße und dem Baumdurchmesser. Zwar ist bei günstig zugeschnittenen kleinen Flächen von einer kürzeren mittleren Rückeentfernung auszugehen als bei großen Flächen, allerdings ist hier keine eindeutige Gesetzmäßigkeit festzustellen. Die tatsächliche Rückeentfernung zeigt sich weniger von der Flächengröße beeinflusst, sondern eher von dem Zuschnitt der Flächen beziehungsweise dem Verlauf der Waldwege, der Rückegassendichte sowie dem Auftreten von Hindernissen auf der Fläche.

Zwar haben die Baumkronen dicker Bäume in der Regel auch ein größeres Kronenvolumen als diejenigen kleiner Bäume mit demselben Kronenzopfdurchmesser inne, jedoch definiert sich im Wesentlichen das Volumen der Kronen über den Zopfdurchmesser. Aus diesem Grund ist davon auszugehen, dass durch den geringen Stichprobenumfang der Literaturstudie eine zufällige Übereinstimmung der Variablen, die eine signifikante Korrelation mit der Produktivität aufweisen, und den vorgenannten tatsächlichen Einflussgrößen vorgelegen hat. Auf die Anwendung des Modells wird beim Bereitstellungskettenvergleich daher verzichtet, da eine Praxisrelevanz nicht gegeben zu sein scheint.

Im Rahmen der Auswertung von Hiebsprotokollen beziehen sich die Aufzeichnungen auf 30 Flächen, wobei zur Bearbeitung dieser 184 Fuhren durchgeführt und insgesamt 115 Betriebsstunden aufgewendet wurden. Die gewonnene Gesamtmenge an Hackgut beträgt 1478 Schüttraummeter. Somit liegt das durchschnittliche Ladevolumen der Forwarder bei etwa acht Schüttraummeter je Fuhre (s. Tabelle 45).

Tabelle 45: Ergebnis der hiebsweisen Leistungsaufschriebe beim Rücken von Schlagabraum (N = 30).

	\bar{x}	Min.	Max.	S
TAP [SRm/BS]	13,5	8,8	18,0	2,5
Ladevolumen [SRm/Fuhre]	8,4	5,1	12,9	1,8
Zeitbedarf [min/Fuhre]	39,0	17,1	68,6	11,7

Das durchschnittliche Ladevolumen im Rahmen der vorliegenden Arbeit zeigt sich sicherlich durch die Tatsache beeinflusst, dass die Verwertung des Schlagabraums bei der Aufarbeitung nicht berücksichtigt wurde. Aus diesem Grund wurden Wipfelstücke teils eingeschnitten und Ast- und Kronenholz bei der vorhergegangenen Holzernte partiell überfahren. Die Auswertung der Hiebsprotokolle zeigt, dass das Fassungsvermögen pro Fuhre mit zunehmender Rückeentfernung steigt: So beträgt bei einer durchschnittlichen Rückeentfernung von 300 bis 400 Metern das mittlere Ladevolumen 9,5 Schüttraummeter, während es sich bei Rückeentfernungen bis 100 Meter auf 7,8 Schüttraummeter beläuft. Dieser Zusammenhang zeigt sich auch durch einen positiven Korrelationskoeffizienten von 0,838; der beidseitig mit einer Fehlerwahrscheinlichkeit von kleiner 0,05 signifikant ist. Dieses unerwartete Ergebnis ist vermutlich darauf zurückzuführen, dass der Fahrer bei größeren Rückedistanzen mehr Sorgfalt beim Beladen walten lässt, hierfür entsprechend auch mehr Zeit aufwendet und auf die bessere Auslastung des Fassungsvermögens achtet. Bei kürzeren Distanzen lohnt dieser Aufwand vermutlich nicht, da der Zeitverlust für den Transport einer weiteren Fuhre geringer ist. Eine bessere Sicherung der Ladung bedeutet zudem, dass weniger Material während der Fahrt verloren geht – eine Vermutung, die sich durch das gleichbleibende Ladevolumen über längere Strecken belegen lässt.

Die durchschnittliche Produktivität von 13,5 Schüttraummetern pro Betriebsstunde (s. Tabelle 45) erreicht nicht den Mittelwert der Angaben aus der Fachforschung. Auffallend ist, dass die Werte wenig streuen ($s = 2,5$ SRm/BS), da aber aufgrund der hiebsweisen Auswertung bereits Mittelwerte verglichen werden, ist das Fehlen von Ausreißern weniger beachtenswert.

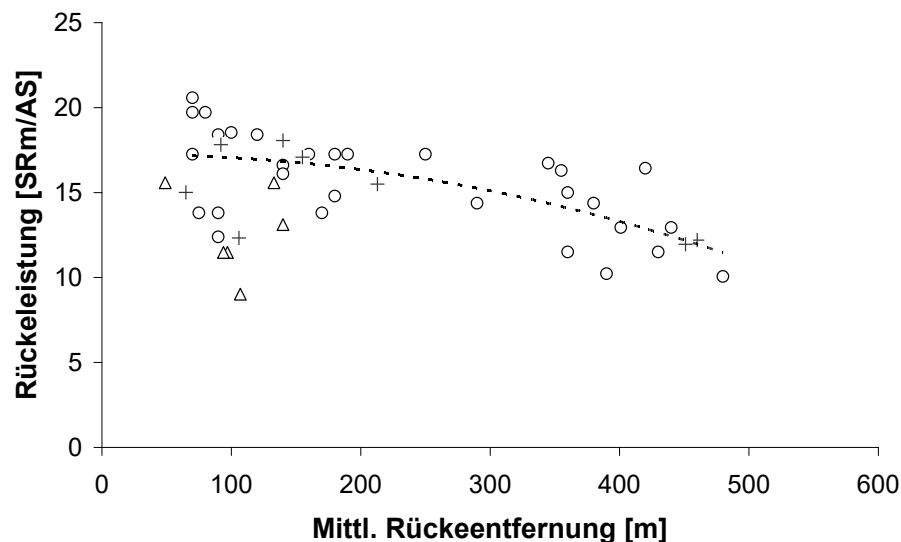


Abbildung 38: Die Leistung beim Rücken von Schlagabraum in Abhängigkeit zur mittleren Rückeentfernung. Kreise: eigene Erhebungen (N = 30); Dreiecke: GEWECKE, 2004 (N = 7); Kreuze: STERNER, 2004 (N = 8); gestrichelt: polynomische Trendlinie ($R^2 = 0,42$).

Bedingt durch die Aufnahmemethode kann lediglich die Rückeentfernung als Einflussvariable auf die Produktivität untersucht werden, wobei sich allerdings ein deutliches Ergebnis offenbart: Es liegt eine starke negative Korrelation zwischen der Rückeentfernung und der Produktivität vor. Mit zunehmender Rückeentfernung sinkt die Produktivität, dabei ist die Korrelation auf einem Niveau von 0,05 signifikant. Die mittlere Rückeentfernung liegt bei den 30 Flächen zwischen 70 und 480 Metern (s. Abbildung 38). Der Mittelwert beläuft sich auf circa 230 Meter.

Zur Abschätzung der Produktivität im Rahmen eines Bereitstellungskettenvergleichs und einer Kostenkalkulation soll pauschal mit dem anhand der Literaturstudie (vgl. Tabelle 1.1-2 im Anhang) erfassten Mittelwert in Höhe von 20 Schüttraumetern je Betriebsstunde gerechnet werden (s. Tabelle 43). Um dennoch der Rückeentfernung Rechnung zu tragen, werden die Korrekturfaktoren von LÜTHY (1997) angewendet (s. Tabelle 46). Darüber hinaus soll mit einem Abschlag der Produktivität beim Rücken unter schwierigen Verhältnissen im steilen Gelände, analog der Vorgehensweise der AFL (2012), kalkuliert werden. Um die Produktivität an die vorliegenden Verhältnisse anzupassen, reduziert sich diese bei Zunahme der Geländeneigung um jeweils 10 Prozent je Geländestufe.

Tabelle 46: Korrekturfaktoren zur Angleichung der Produktivität beim Rücken bei einer von 100 Metern abweichenden mittleren Rückeentfernung (nach LÜTHY, 1997).

Rückeentfernung	100 m	200 m	300 m	400 m	500 m	700 m	>700 m
Korrekturfaktor	1	0,97	0,93	0,89	0,86	0,8	0,75

Der kalkulierte Stundensatz für einen Forwarder beläuft sich auf 89 Euro je MAS (s. Tabelle 1.1-4 im Anhang).

5.2.2 Teilprozess mobile Zerkleinerung von Schlagabraum – Zeitverbrauch

Beim Vergleich der konventionellen Stammholz- mit der Restholzernte liegen insbesondere durch die mobile Zerkleinerung am Waldweg entscheidende Unterschiede vor: Zum einen entsteht ein zusätzlicher Arbeitsschritt zwischen Lagerung am Waldweg und Abfuhr des Holzes, durch den zum anderen der Aggregatzustand des Holzes verändert wird. Konsequenz der Zerkleinerung sind modifizierte Lagerungs- und Energiedichten was wiederum Einfluss auf die Erfassung von Masse und Volumen des Holzes ausübt. Die in der Forstpraxis üblichen Einheiten Festmeter und Raummeter können ohne Umrechnung nicht übernommen werden; stattdessen existieren Schüttvolumen, Masse oder Energiegehalt als heranziehbare Größen. Gerade bei der Bestimmung und Umrechnung kommt es in der Praxis oft zu Ungeheimtheiten (s. Kapitel 2.5; EBERHARDINGER ET AL., 2009).

Die Zerkleinerung gilt als wichtigstes Glied in der Bereitstellungskette von Waldrestholz (EBERHARDINGER, 2011; CREMER, 2008 u. a.). Die Gründe hierfür sind, dass erstens der Hacker in der Regel die teuerste Maschine im Arbeitssystem darstellt und zweitens, dass der Ablauf der mobilen Hackung hohe Anforderungen an die logistischen Abläufe bereithält. Die Herausforderung sind dabei einerseits, die Stillstandzeiten des Hackers durch ausreichende Transportkapazitäten zu verhindern, und andererseits, die Produktivität des Hackers durch gute Arbeitsvorbereitung und Materialauswahl zu erhöhen.

Die Auswertung der tageweisen Leistungsaufschriebe im Rahmen der mobilen Zerkleinerung von am Waldweg gepoltertem Schlagabraum unterstreicht den hohen Zeitaufwand für Warte- und andere unproduktive Zeiten. Den insgesamt angegebenen Arbeitsstunden der Maschinenführer in Höhe von 204 Stunden stehen circa 92 Betriebsstunden der Maschinen gegenüber, was bedeutet, dass die Betriebsstunden etwa 45 Prozent der Gesamtarbeitszeit ausmachen. In der Gesamtheit der Arbeitsstunden sind allerdings die persönlichen Verweilzeiten der Maschinenführer nicht berücksichtigt: Es handelt sich hierbei um diejenige Anzahl an Stunden, die sich später auf der Lohnabrechnung findet. Eine strikte zeitliche Trennung der Arbeitsabläufe, wie es eine Zeitstudie durchführt, ist an dieser Stelle grundsätzlich nicht möglich, da es sich um teilweise gerundete Selbstaufschriebe der Fahrer handelt. Neben den Wartezeiten zählen auch die Dauer für das Umsetzen des Hackergespanns (ca. 15 %) und für die Reparatur und Wartung der Fahrzeuge (ca. 5 %) zu den unproduktiven Zeiten, die der Maschinenführer jeweils separat am Ende des Tages erfasst.

Tabelle 47: Ergebnis der tageweisen Leistungsaufschriebe bei der mobilen Hackung (N = 22).

	\bar{x}	Min	Max.	S
L (H) HEM 561 [SRm/BS]	43	27	65	12,9
L (H) HEM 560 [SRm/BS]	45	34	58	9,1
TAP Gesamt [SRm/BS]	44	27	65	11,2

Die durchschnittliche Produktivität als arithmetisches Mittel der Tagesleistungen liegt bei 44 Schüttraummeter pro Betriebsstunde (s. Tabelle 47) und unterscheidet sich von dem

Verhältnis der Gesamtmenge zu den Gesamtbetriebsstunden (gew. Mittel 46,5 SRm/BS) über alle Tage nur geringfügig.

Es ist davon auszugehen, dass, bedingt durch die hohe technische Entwicklung und die Verwendung leistungsstarker Motoren ab 200 Kilowatt in der professionellen Holzerkleinerung, das Kriterium der Holzdimensionierung in einem Rahmen von fünf bis 30 Zentimetern Zopfdurchmesser hinsichtlich der Einflussnahme auf die Produktivität zu vernachlässigen ist. Auch die Baumart und die Homogenität des Materials scheinen wegen der vergleichsweise großen Motorleistung der Maschinen und der Materialbeschickung durch einen Ladekran die Ertragfähigkeit der Hacker kaum noch zu beeinflussen (vgl. WEIXLER ET AL., 1999). Vielmehr zeigt sich die Qualität der Organisation als ein entscheidender Faktor für die Produktivität beim Hacken: So sind beispielsweise die Größe der einzelnen Hackplätze und der zügige Abtransport des zerkleinerten Holzes zu nennen. Infolgedessen wird zur Ermittlung der Produktivität und der Kosten des Hackereinsatzes auf ein Modell zur Berechnung der Hackerleistung verzichtet. Die benannte Leistung des Hackers kann individuell festgelegt werden und sich an den Herstellerangaben orientieren, dabei ist allerdings auf die Verwendung der korrekten Einheit für die Leistungsangabe zu achten, da Maschinenhersteller in der Regel ihre Angaben auf die Stunde BS beziehen. Für die folgenden Berechnungen wird jedoch ein Wert von 50 Schüttraummetern je MAS festgesetzt.

Der gesamte Zeitbedarf, der für das Hacken aufgewandt werden muss ($Z(H)$), bemisst sich in der Summe der MAS beim Hacken ($Z_{MAS}(H)$), die durch Division der Gesamtmenge des zu zerkleinernden Materials ($V(Holz)$) und der festgesetzten Produktivität des Hackers ($L(H)$) zu ermitteln ist (1), zuzüglich der Zeiten für das Warten ($Z_w(H)$) auf die Transportfahrzeuge (2).

$$\frac{V(Holz)}{L(H)} = Z_{MAS}(H) \quad (1)$$

$$Z(H) = Z_{MAS}(H) + Z_w(H) \quad (2)$$

Mögliche Unterbrechungen für kleine Reparatur- oder Wartungsarbeiten sind bei der Leistungsangabe und der Maschinenkostenkalkulation bereits berücksichtigt; darüber hinausgehende Unterbrechungen sollen bei dieser Kalkulation außer Acht gelassen werden, da diese schwer abzuschätzen sind und entsprechende Nachweise in der Literatur oder innerhalb der eigenen Aufnahmen zur Berechnung des Zeitaufwands fehlen.

Zur Bestimmung der Kosten jedoch soll der Einfluss der Organisation bei der Berechnung zum Hackereinsatz Berücksichtigung finden; zu diesem Zweck verwendet diese Studie die Ergebnisse zur Berechnung der Produktivität beim Abfahren der Hackschnitzel. Die relative Wartezeit des Hackers (*rel. $Z_w(H)$*) als Anteil am Gesamtzeitverbrauch beim Hacken ergibt sich dann, indem das Produkt aus der Leistung eines einzelnen Lkws ($L(Lkw)$) und der Anzahl der zeitgleich eingesetzten Lkw ($N(Lkw)$) durch die Hackerleistung dividiert und von eins abgezogen wird (3).

$$N(Lkw) > 1 \vee V(Holz) > V_{IST}(Lkw) \rightarrow rel.Z_w(H) = 1 - \frac{L(Lkw) \cdot N(Lkw)}{L(H)} \quad (3)$$

Es gilt: $\frac{L(Lkw) \cdot N(Lkw)}{L(H)} > 1 \rightarrow Z_w(H) = 0$

Ist das Produkt aus der Leistung eines einzelnen und die Anzahl aller eingesetzten Lkw größer als die Leistung des Hackers, dann entsteht keine Wartezeit. Durch den relativen Zeitanteil des Wartens und der MAS beim Hackvorgang lässt sich der Gesamtzeitverbrauch ermitteln (4). Subtrahiert man die MAS von der Gesamtzeit, erhält man gemäß Formel (4) die Wartezeit des Hackers für die gesamte Einsatzdauer.

$$Z(H) = \frac{Z_{MAS}(H)}{rel.Z_w(H)} \rightarrow Z_w(H) = Z(H) - Z_{MAS}(H) \quad (4)$$

Wenn auf der einen Seite lediglich ein Lkw eingesetzt wird oder auf der anderen mehrere Lkw für den Einsatz eingeplant werden, aber aufgrund einer fehlerhaften Volumeneinschätzung im Vorfeld der Maßnahme die gesamte Holzmenge geringer ausfällt als das maximale Ladevolumen eines Lkws, dann kann die Wartezeit des Hackers maximal die Höhe der Zeiten für das Manipulieren der Lkw betragen (5).

$$N(Lkw) = 1 \vee V(Holz) < V_{IST}(Lkw) \rightarrow Z_w(H) = Z_{mani}(Lkw) \quad (5)$$

Die Modellberechnung bezieht sich bei der Festlegung der jährlichen Einsatzdauer auf die größtmögliche jährliche Arbeitszeit (Einsatzstunden) des Maschinenführers und der ‚Auslastungsquote der Maschine (aq)‘ (vgl. Kapitel 3.5.1), definiert als Quotienten aus der tatsächlichen produktiven Zeit und dem Gesamtzeitbedarf beim Hacken, die sich somit gemäß Formel (6) für den kalkulierten Einsatz ergibt.

$$aq = \frac{Z_{MAS}(H)}{Z(H)} \quad (6)$$

Auf diese Weise können theoretisch maximal 1327 Maschinenstunden pro Jahr im Einschichtbetrieb geleistet werden. Es besteht zudem die Option, die jährliche Laufleistung des Hackers individuell in das Modell einzugeben, zum Beispiel, wenn abzusehen ist, dass der kalkulierte Einsatz nicht die durchschnittlichen Einsatzbedingungen eines Jahres widerspiegelt. Die manuell festgelegte Jahreslaufleistung wird dann zur Berechnung der Durchschnittskosten herangezogen, wobei sich die Kosten des Einsatzes errechnen lassen, indem man die Zeit für das Hacken mit den Durchschnittskosten und die Wartezeit mit den Fixkosten multipliziert.

5.2.3 Teilprozess mobile Zerkleinerung von Schlagabraum – Kosten

Um die Kosten des Maschineneinsatz bei unterschiedlichem Jahresnutzungsgrad auszuforschen, sind zunächst die variablen Ausgaben von Bedeutung (s. Tabelle 50), wozu in erster Linie die Betriebskosten, wie Kraftstoff und Schmiermittel, zählen. Weitere Posten, wie Kosten für Wartung und Reparatur, aber auch die Ausgaben für die Abnutzung sind nicht grundsätzlich und eindeutig den variablen oder fixen Kosten zuzuschlagen. So existieren beispielsweise Wartungsverträge oder -verpflichtungen, die, unabhängig von einem leistungsbedingten Verschleiß, beim Erreichen eines festen Zeitintervalls²² durchgeführt werden müssen. Ein gutes Beispiel hierfür ist der Wechsel des Motorenöls nach 500 Betriebsstunden oder einem Jahr, der von den Maschinenherstellern eingefordert wird. Auch wenn Reparaturkosten in der Regel durch leistungsbedingten Verschleiß auftreten, können gleichwohl lange Stillstandszeiten Reparaturkosten verursachen, die insofern wiederum unabhängig von der Faktoreinsatzmenge sind. Um der Tatsache Rechnung zu tragen, dass die Reparaturkosten mit zunehmender Laufleistung der Maschinen, gemessen an den Durchschnittskosten, steigen und bei Nichterreichen der maximalen Nutzungsdauer somit geringere Durchschnittskosten zu erwarten sind, werden die Reparaturkosten bei nicht existenter Auslastung um den Einsatzstundenteil im Verhältnis zur Volllastung reduziert (vgl. JACKE, 2007D).

Abschreibungskosten können, abhängig von den Ursachen der Abschreibung, ebenfalls dem fixen und dem variablen Aufwand zugeteilt sein. Gründe für Abschreibungen nach WÖHE ET AL. (2000) sind:

- 1) ruhender Verschleiß
- 2) technischer Fortschritt
- 3) Fristablauf²³
- 4) leistungsbedingter Verschleiß
- 5) Substanzminderung.

Hierbei sind insbesondere die Ursachen Verschleiß und Substanzabbau nutzungsbedingt, während die übrigen Aspekte nach der Zeit gemessen werden können und sich als unabhängig vom tatsächlichen Jahresnutzungsgrad zeigen (s. Tabelle 48). Daher ist es möglich, außer der üblichen zeitbezogenen Abschreibung auch eine nach Leistungseinheiten²⁴ vorzunehmen; bei dieser wird die (variable) Jahresleistung des Anlageguts am Gesamtpotential der Maschine als Abschreibungsbetrag angesetzt. Diese Form der Abschreibung kann etwa dann vonnöten sein, wenn durch mangelnde Organisation beim Hackereinsatz erhebliche Schwankungen in der jährlichen Maschinenlaufleistung und damit beim Verschleißausmaß auftreten.

Daraus ergibt sich die Frage, ab welcher jährlichen Leistungsbeanspruchung (j) eine zeitbezogene beziehungsweise leistungsabhängige Abschreibung erfolgen soll: Als hilfreich erweist sich in diesem Kontext die sogenannte ‚Schwelle der variablen Abschreibung‘ (vgl. SCHNEEBERGER ET AL., 2011), welche die Höhe der jährlichen Maschinenbeanspruchung darstellt, ab

²² Das Zeitfenster zwischen den planmäßigen Wartungsarbeiten nennt man im technischen Sprachgebrauch: „TBO“ (Time Between Overhaul).

²³ Ablauf von Nutzungsrechten, bspw. Nutzungsverbot von alten Dieselmotoren ohne Abgasreinigung.

²⁴ Stundenlaufzeit, Stückzahl, Kilometerleistung.

der eine leistungsbedingte Abschreibung folgerichtig wird. Sie ist in der Regel dort gegeben, wo die leistungsbedingte Abnutzung die Lebensdauer der Maschine stärker einschränkt als die zeitbedingte Abschreibungsursache. Diese Schwelle der variablen Abschreibung errechnet sich als Quotient aus der jährlichen Einsatzzeit und den Nutzungsjahren und wird angegeben in Betriebsstunden pro Jahr.

Tabelle 48: Kostenkalkulation Anhängenhacker: Ergebnis Fixkosten.

D_h	Fixkosten	
11.	Kalk. Abschreibung	36.000 €/a
12.	Kalk. Zinsen	17.600 €/a
13.	Sonstiges	56.000 €/a
14.	Reparatur, Wartung	5.000 €/a
15.	Personal	38.400 €/a
16.	Fixkosten gesamt	153.000 €/a

Folgt man der Kalkulation von JACKE (2007B) für einen Aufbauhacker, resultiert aus einer Veralterungszeit von 10 Jahren und einer maximalen Nutzungsdauer von 15 Tausend Maschinenstunden ein Schwellenwert von 1500 Betriebsstunden pro Jahr. Bis zu diesem Schwellenwert sollte eine fixe zeitabhängige Abschreibung vorgenommen werden, überschreitet die jährliche Maschinenauslastung diese Grenze, erfolgt zusätzlich zu der fixen zeitbezogenen Abschreibung eine variable und leistungsabhängige. Tabelle 48 und Tabelle 50 zeigen noch einmal den Einfluss der Abschreibungsmethode auf unterschiedliche Maschinenlaufleistungen pro Jahr auf.

Tabelle 49: Kostenkalkulation Anhängenhacker: Rechenwege variable Kosten (j: jährliche Leistungsbeanspruchung).

E_h	Variable Kosten	Rechenwege
17.	Betriebskosten (BK)	$BK = j \cdot 60,64 \text{ €/MAS}$
		$j \cdot \frac{1}{aq} > 1.659 h \Rightarrow Pv = \left(j \cdot \frac{1}{aq} - 1.659 \right) \cdot 28 \text{ €/MAS} \quad \checkmark$
18.	Personal (Pv)	$j \cdot \frac{1}{aq} \leq 1.659 h \Rightarrow Pv = 0$
		$j \geq 1.500 \text{ MAS} \Rightarrow 23,76 \text{ €/MAS} \quad \checkmark$
19.	Reparatur (Rv)	$j < 1.500 \text{ MAS} \Rightarrow 23,76 \text{ €/MAS} \cdot \frac{j}{1.500}$
		$j \leq 1500 \Rightarrow Av = 0 \quad \checkmark$
20.	Kalk. Abschreibung (Av)	$j > 1500 \Rightarrow Av = 24 \text{ €/MAS} \cdot (j - 1500)$
21.	Var. Kosten ges. (Kv)	$Kv = BK + Pv + Rv + Av$

In Tabelle 49 sind die Rechenwege für die Ermittlung der variablen Kosten aufgeführt, wie sie auch im Modell zum Einsatz kommen. Die Personalkosten sind ebenfalls von einer Aufspaltung in variable und fixe Kosten betroffen. Es wird zwar bei Maschinenkostenkalkulationen in

der Regel lediglich der Kostensatz für das Bedienpersonal auf Stundenbasis - somit als variable Kosten - angegeben, allerdings entspricht diese Vorgehensweise nicht der Realität, sofern es zu schwankenden jährlichen Maschinenlaufleistungen kommt. Für eine variable Betrachtung spricht in der Theorie sicherlich, dass die Maschinenführer auch für andere Tätigkeiten zur Verfügung stehen, wenn tatsächlich ein Ausfall des Hackers erfolgt oder dieser schlicht nicht im Einsatz ist; in der Praxis zeigt sich allerdings ein anderes Bild (KEMPER, 2013; SCHUMACHER, 2007): So wird häufig ein Bediener je Maschineneinheit eingesetzt, der für den Betrieb des Hackers zur Verfügung steht. Die wechselnde Auslastung wird teilweise über ein Stundenkonto (variable Kosten) verrechnet. Insbesondere jedoch, wenn die Maschinenlaufleistung zugunsten von Wartezeiten und übrigen unproduktiven Zeiten abnimmt, die Jahresarbeitszeit des Maschinenführers aber bereits erreicht ist, sind die Personalkosten als fixe Kosten zu betrachten, die nicht weiter, analog zu der geringen Maschinenlaufleistung, reduziert werden können.

Tabelle 50: Kostenkalkulation Anhängenhacker: Ergebnis variable Kosten.

F_h	Variable Kosten	Einsatzumfang pro Jahr in MAS			
		500 h	1.000 h	1.500 h	2.000 h
17.	Betriebskosten	30.320 €/a	60.640 €/a	90.960 €/a	121.280 €/a
18.	Personal	0 €/a	0 €/a	6.048 €/a	23.548 €/a
19.	Reparatur	3.960 €/a	15.840 €/a	35.640 €/a	47.520 €/a
20.	Kalk. Abschreibung	0 €/a	0 €/a	0 €/a	12.000 €/a
21.	Var. Kosten gesamt	34.280 €/a	76.480 €/a	132.648 €/a	204.348 €/a

Somit ergeben sich die in Tabelle 51 aufgeführten unterschiedlichen Maschinenkosten je Leistungseinheit (Durchschnittskosten) in Abhängigkeit zur Jahreslaufleistung. Die Kostenkalkulation bezieht sich auf einen Großhacker mit einem Beschaffungspreis von 400 Tausend Euro. Die von JACKE (2007B) in seiner Kalkulation ermittelten Kosten für einen Aufbauhacker werden entsprechend des höheren Beschaffungspreises analog umgerechnet.

Tabelle 51: Kostenkalkulation Anhängenhacker: Ergebnis Gesamtkosten.

G_h	Gesamtkosten	Einsatzumfang in MAS			
		500 h	1.000 h	1.500 h	2.000 h
22.	Fixkosten	153.000 €/a	153.000 €/a	153.000 €/a	153.000 €/a
23.	Var. Kosten	34.280 €/a	76.480 €/a	132.648 €/a	205.681 €/a
24.	Gesamtkosten	187.280 €/a	229.480 €/a	285.648 €/a	358.681 €/a
25.	Durchschnittskosten	374,56 €/h	229,48 €/h	190,43 €/h	179,34 €/h
26.	Grenzkosten	76,50 €/h	138,79 €/h	146,07 €/h	146,07 €/h
27.	Auslastungsquote	0,3	0,6	0,8	0,8

Sollte aus schlechter Organisation im Ablaufprozess ein erhöhter Anteil von unproduktiver Zeit (Warten, Umsetzen etc.) an der Gesamtarbeitszeit resultieren und dadurch ein geringeres Arbeitspensum abgeleistet werden, erreicht man eine reduzierte Laufleistung pro Jahr

(500 MAS). Dabei kommt es bedingt durch die unproduktive Zeit zu einer geringeren Auslastungsquote der Maschine ($aq = 0,3$). Ab einer jährlichen Einsatzdauer in Höhe der Jahresarbeitszeit des Maschinenführers unter Berücksichtigung von Urlaubs- und Krankentagen sowie der gängigen Auslastungsquote von 0,8 wird die Quote in diesem Modell auch bei steigenden Laufleistungen nicht verändert. Dies ist der gleiche Wert, den auch diverse Fachforscher bei optimalen Bedingungen hinsichtlich Organisation und bei möglichen Wartezeiten der Transportmittel als realistisch erachten (u. a. CREMER, 2008; KÖBERLE, 2007; WITTKOPF, 2005).

5.2.4 Teilprozess Transport von Hackschnitzeln – Ladevolumen und zulässige Nutzlast

Der Hackschnitzeltransport unterscheidet sich in einigen Punkten grundlegend von der Beförderung übriger genormter Güter, aber auch vom Rundholztransport. Hackschnitzel gelten als Schüttgut und sind somit von entsprechenden Muldenfahrzeugen zu transportieren. Die Entladung erfolgt durch Kippen oder Abschieben, gegebenenfalls in Zusammenhang mit Blasen oder Pumpen. Im Rahmen der mobilen Zerkleinerung sind zwar Fahrten auf Waldwegen unerlässlich, jedoch werden im Gegensatz zu den Fahrzeugen im Rundholzverkehr dabei nur selten Lkw eingesetzt, die für den Betrieb außerhalb befestigter Straßen ausgelegt sind. Hilfreiche Ausrüstungen für Fahrten auf Waldwegen, wie robuste Bauweise, Allradbetrieb und lenkbare Nachläufer, sind in der Regel nicht vorhanden. Der Warenwert der Fracht, gerade bei Hackgut aus Waldrestholz, ist relativ gering und führt mit zunehmender Entfernung zu einem Rentabilitätsproblem (EBERHARDINGER, 2011).

Das Ladevolumen beziehungsweise die maximal zulässige Nutzlast stellt neben der Transportdistanz und der Fahrzeuggeschwindigkeit die wichtigste Einflussgröße auf die Transportleistung dar. Hierbei sind erhebliche Unterschiede bei den Fahrzeugvarianten auszumachen (s. Tabelle 52), was sowohl die maximal zulässige Geschwindigkeit, das systembedingte Transportvolumen als auch die Anzahl und Achsanordnung der Anhänger betrifft.

Je geringer die Schüttdichte der Hackschnitzelsortimente ist, desto eher wird das maximale Ladevolumen zum beschränkenden Faktor bei der Transportauslastung. Allerdings befinden sich bei voller Auslastung des Ladevolumens und einer Schüttdichte der Hackschnitzel von mehr als 310 Kilogramm je Schüttraummeter²⁵, zwei der vier in Tabelle 52 dargestellten Transportvarianten oberhalb der zulässigen Gesamtmasse. KANZIAN ET AL. (2006A) zeigen in umfassenden Berechnungen den Einfluss des Wassergehalts und der Transportdistanz auf die anfallenden Kosten.

Für die Beförderung von Hackschnitzeln kommen zunächst landwirtschaftliche Transportsysteme (Schlepper mit ein bis zwei Anhängern), die seit Beginn der Nutzung von Hackgut aus Waldrestholz eine weitverbreitete Transportvariante repräsentieren, in Betracht. In den meisten Fällen richtet sich die Ausstattung der Fahrzeuge und Anhänger nach den sonstigen Bedürfnissen der landwirtschaftlichen Betriebe und Lohnunternehmen: Diese können ganz verschiedenartig ausfallen, was mit den unterschiedlichen Produktionsrichtungen der landwirtschaftlichen Betriebe zusammenhängt. In diesem Zusammenhang sollte das generelle

²⁵ Z. B. Hackschnitzel aus Fichtenschlagabraum mit einem Wassergehalt von ca. 50 %.

Transportvolumen in der Landwirtschaft nicht unterschätzt werden, denn es beträgt mit etwa 500 Millionen Tonnen pro Jahr mehr als das der deutschen Bundesbahn. Anders verhält es sich mit den zurückzulegenden Strecken: Durchschnittlich werden Produkte in der Landwirtschaft über eine Entfernung von vier Kilometern bewegt – ein ausnehmend geringer Wert (FRÖBA ET AL., 2001).

Tabelle 52: Maximales Ladevolumen und gesetzlich zulässige Nutzlast von vier Transportalternativen für den Transport von Schüttgut. Angegeben wird die Auslastung der gesetzlich zulässigen Nutzlast bei voller Ausnutzung des maximalen Ladevolumens und bei unterschiedlichen Hackgutdichten in Prozent.

	Ladevolumen [SRm]	Gesetzl. zul. Nutzlast [t]	Auslastung Nutzlast [%]	
			40 % WG ²⁶	30 % WG ²⁷
Landw. Schlepper Abschiebeanhänger	52	20,6	63,86	54,78
Landw. Schlepper 2 Kipper	40	22,6	44,78	38,41
Gliederzug-Lkw Ab- rollcontainer	76	23,0	83,60	71,70
Sattelzug-Lkw Schub- bodenaufleger	90	25,0	91,08	78,12

Die Lkw-Transportvarianten offerieren in der Regel ein größeres Transportvolumen als landwirtschaftliche Schlepper, weil die nutzbare Länge der Ladefläche größer ist, insbesondere wenn man diese mit einem Schlepper mit zwei Anhängern vergleicht. Entsprechend wird die maximal zulässige Nutzlast bei der Transportvariante Schlepper mit Abschiebeanhänger erst ab einer Schüttdichte von circa 565 Kilogramm pro Kubikmeter erreicht, während im Gegensatz dazu der Sattelzug-Lkw bereits ab einer Schüttdichte der Hackschnitzel von 278 Kilogramm pro Kubikmeter als überladen einzustufen ist. Neben dem größeren Transportvolumen kommt die deutlich höhere Geschwindigkeit der Beförderung von bis zu 80 Kilometern pro Stunde beim Lkw, verglichen mit bis zu 50 Kilometern pro Stunde bei landwirtschaftlichen Schleppern zum Tragen (HERRMANN ET AL., 2000). Auch die Motorleistung des Lkws übersteigt die des Schleppers in der Regel deutlich, wodurch bei Ersterem zudem ein schnelleres Beschleunigen möglich ist. Des Weiteren zeigt sich der durchschnittliche Kraftstoffverbrauch für Lkw, bedingt in erster Linie durch die kleineren Reifen mit höherem Reifeninnendruck, geringer als bei landwirtschaftlichen Schleppern. OTTO (2012) und FRÖBA ET AL. (2005) stellen bei Fahrten auf Landstraßen mit vergleichbarer Nutzlast, einen Mehrverbrauch der Schlepper gegenüber dem Lkw von 70 bis 85 Prozent pro gefahrenem Kilometer fest. Bei einem Vergleich der Zugmaschine ohne Anhänger ermittelt KOWALEWSKY

²⁶ Entspricht Hackschnitzeln aus Fichte mit einem Wassergehalt von 40 % und einer Schüttdichte von 217 kg/SRm (WITTKOPF, 2005).

²⁷ Entspricht Hackschnitzeln aus Fichte mit einem Wassergehalt von 30 % und einer Schüttdichte von 253 kg/SRm (WITTKOPF, 2005).

(2011) einen nahezu um das Dreifache höheren Verbrauch des Schleppers (265 PS) gegenüber dem Lkw (360 PS). Als Ursache für diesen vergleichsweise großen Unterschied gibt er das aufwendigere Getriebe des Schleppers und zusätzlich dessen anzutreibende Hydraulikpumpen sowie den niedrigeren Luftdruck in dessen Reifen an und stellt zudem die unterschiedliche Motor- und Getriebeabstimmung zwischen Lkw und Schlepper heraus.

Auf der anderen Seite überzeugen die landwirtschaftlichen Schlepper mit ihrer Beschaffenheit hinsichtlich Bereifung und Antriebsübersetzung und weisen deutliche Vorteile bei Fahrten außerhalb von befestigten Straßen auf. Hier kommen insbesondere die breiten, stark profilierten Reifen mit dem deutlich niedrigeren Reifenfülldruck zum Tragen, wodurch eine große Aufstandsfläche erreicht wird. Die Fahrzeugmasse findet sich so besser auf dem Boden verteilt und die Traktion wird erhöht (vgl. JACKE ET AL., 2010).

Tabelle 53: Maximal zulässiges Ladevolumen, Mittelwert vom Transportvolumen bei den Datenaufnahmen und die Auslastungsprozente bezogen auf das zulässige Ladevolumen beziehungsweise die maximale Nutzlast bei den drei Transportalternativen für den Holzhackguttransport.

	Zul. Ladevolumen [SRm]	\bar{x} Ladevolumen [SRm]	Auslastung Volumen [%]	Auslastung Masse ²⁸ [%]
Landw. Schlepper Abschiebeanhänger	52	49,2	94,62	60,43
Landw. Schlepper 2 Kipper	40	39,5	98,75	44,22
Gliederzug-Lkw Ab- rollcontainer	76	70,4	92,63	77,44

Hinsichtlich der gesetzlich zulässigen Nutzlast nach StVZO (2012) der drei Transportvarianten ist der Lkw leicht überlegen, da er insbesondere gegenüber dem Tridemanhänger etwa 10 Prozent mehr Nutzlast aufnehmen kann. Der Unterschied zum Schlepper mit den beiden Zweiachsskippern erweist sich bezüglich der Nutzlast als minimal (vgl. Tabelle 52), deutlich wird die Differenz hingegen beim zulässigen Ladevolumen. Hier kann der Lkw im Vergleich zu den beiden Zweiachsanhängern nahezu das Doppelte mit sich führen (vgl. Tabelle 53). In der angestellten Versuchsreihe schöpfte im Durchschnitt keine der Transportvarianten das Ladevolumen voll aus, lediglich der Rollbandwagen transportierte bei zwei Gelegenheiten und der Lkw auf sechs Fahrten mehr Volumen als zulässig. Da allerdings aufgrund der Arbeitsorganisation nicht alle Fahren mit voller Auslastung durchgeführt werden konnten, liegt das mittlere Transportvolumen mit etwa drei Prozent beim Rollbandwagen und acht Prozent beim Lkw unter dem maximal zulässigen Ladevolumen (s. Tabelle 53). Bei der Auslastung hinsichtlich der Masse der Ladung zeigt sich, dass im Rahmen der Versuchseinsätze die Transportfahrzeuge bestenfalls die maximal zulässige Nutzlast um circa 23 Prozent (Lkw) und im schlechtesten Fall um weniger als die Hälfte (Zweiachsanhänger) unterschritten. Diese Zah-

²⁸ Bei einer Schüttdichte der Hackschnitzel von 253 kg/SRm.

len verdeutlichen, dass die Zweiachsanhänger aufgrund ihrer Konstruktion für den Transport von Gütern mit höherer Schüttdichte, wie Getreide oder Düngemittel, ausgelegt sind.

5.2.5 Teilprozess Transport von Hackschnitzeln – Fahren

Bei den Zeitaufnahmen konnten erhebliche Differenzen zwischen den drei Transportvarianten konstatiert werden: Die durchschnittliche Fahrtzeit pro Fuhre fällt bei dem Schlepper mit zwei Anhängern mit etwa 222 Minuten beinahe dreimal so groß aus wie die des Container-Lkws. Jedoch sind diese absoluten Zahlen keineswegs vergleichbar, da sie in unmittelbarer Abhängigkeit zur Transportentfernung stehen.

Tabelle 54: Wesentliche Kennwerte der drei Transportalternativen sowie die Durchschnittsgeschwindigkeit beim Transport von Holzhackgut.

	Schlepper + zwei Zweiachsanhänger	Schlepper + ein Tridemanhänger	Gliederzug Container-Lkw
Motorleistung	199 kW	199 kW	301 kW
Max. Nutzlast	22,6 t	20,6 t	23,0 t
Maximal zulässige Geschwindigkeit			
	40 km/h	50 km/h	80 km/h
Durchschnittsgeschwindigkeit			
Landstraße	36,2 km/h (1)	29,3 km/h (2)	37,1 km/h (3)
Landstraße	37,8 km/h (4)	39,9 km/h (4)	48,5 km/h (4)
Autobahn	---	---	62,5 km/h (4)
Landstraße 27 km	---	---	39,3 km/h (5)
Landstraße <15 km	19,0 km/h (6)	---	45,0 km/h (6)
Mittlere einfache Transportentfernung:	67 km (1)	28 km (2)	27 km (3)
(4) KOWALEWSKY (2011)			
(5) Berechnung nach dem Fahrzeitmodel von FRIEDL ET AL. (2004) für Kurzholzzüge			
(6) PATZAK (1984)			

Aussagekräftiger ist dagegen die Durchschnittsgeschwindigkeit bei den Beförderungen, welche sich jedoch ebenfalls als indifferent erweist und zwischen 29 Kilometern pro Stunde beim Schlepper mit Rollbandwagen und 37 Kilometern pro Stunde beim Container-Lkw liegt (s. Tabelle 54). Dabei ist keine nennenswerte Differenz zwischen den Container-Lkw und dem Schlepper mit zwei Anhängern zu verbuchen. Im konkreten Fall lag die durchschnittliche einfache Beförderungsentfernung für den Lkw-Transport bei 27 und für den Schlepper mit zwei Anhängern bei 67 Kilometern. Auf der relativ kurzen Strecke war eine Autobahnfahrt für den Lkw nicht möglich, was wiederum seine maximal zulässige Geschwindigkeit auf 60 km/h reduziert. Da die technische Höchstgeschwindigkeit des Schleppers mit zwei Anhängern bei über 50 km/h zu verorten ist, wurde das maximal zulässige Tempo in der Regel nicht eingehalten. Verglichen mit dem Fahrzeitmodel für einen Kurzholzzug von FRIEDL ET AL. (2004),

das einen Distanzbereich von 10 bis 120 Kilometern abdeckt, zeigt sich teilweise eine weitreichende Übereinstimmung mit den in der Zeitstudie zum Containertransport gewonnenen Daten. Zieht man die anhand des Modells erstellten Berechnungen zu Rate, beläuft sich die Durchschnittsgeschwindigkeit, bei einer Transportentfernung von 27 Kilometern zwischen Wald und Werk, auf circa 39 Kilometer pro Stunde. Das reell gemessene Mittel des Tempos beträgt etwa 37 Kilometer pro Stunde (s. Tabelle 54). Bei einer einfachen Transportentfernung von 67 Kilometern, wie es bei der Beförderung mit dem Schlepper und dessen zwei Anhängern der Fall ist, errechnet sich nach dem Model von FRIEDL ET AL. bei der Fahrt mit einem Kurzholzzug eine Durchschnittsgeschwindigkeit von circa 52 Kilometern pro Stunde. Die Zeitaufnahmen dokumentieren bei dieser Transportdistanz eine Durchschnittsgeschwindigkeit von 36 Kilometern pro Stunde für den Schlepper mit zwei Anhängern.

5.2.6 Teilprozess Transport von Hackschnitzeln – Laden und Rangieren

Unterschiede zwischen den Transportalternativen treten deutlich auch bei den Ladezeiten hervor, da diese im Wesentlichen von dem Ladevolumen der Transportfahrzeuge und dem eingesetzten Hacker beziehungsweise den übrigen, die Produktivität beeinflussenden Faktoren beim Hacken abhängig sind (vgl. 5.2.2). So verwundert es nicht, dass Bauart bedingt die Zeiten für das Laden bei dem Rollbandwagen mit durchschnittlich 57 Minuten um etwa 20 Minuten geringer ausfallen als bei den Containerfahrzeugen. Letztere weisen zum einen ein deutlich höheres Transportvolumen auf und zum anderen muss bei den Rollbandwagen lediglich ein Behälter befüllt werden. Die beiden Kipper verzeichnen eine durchschnittliche Ladezeit von 56 Minuten pro Fuhre, allerdings werden gegenüber dem Rollbandwagen 10 Kubikmeter pro Fuhre weniger befüllt. Entsprechend unterscheidet sich auch der relative Zeitverbrauch für die Beladung bei den unterschiedlichen Varianten. Die Differenz ist allerdings nur zu einem geringen Maß von der Transportvariante beeinflusst und auch im Allgemeinen sind beide Fälle schwer miteinander vergleichbar, da die Einsätze an unterschiedlichen Orten, mit uneinheitlichem Holz und verschiedenen Maschinen durchgeführt wurden. Mit 1,1 Minuten pro Schüttraummeter ist der relative Zeitaufwand beim Beladen der Container am geringsten.

Container bieten den Vorteil, dass sie abgesetzt und schräg gestellt werden können; die Manipulation beim Beladen erfordert kein manuelles Eingreifen. Der Rollbandwagen zeichnet sich im Gegensatz dazu dadurch aus, dass nur ein Behälter gefüllt werden muss und das Rangieren, trotz der Ausmaße des Anhängers, einfach zu bewerkstelligen ist. Nachteilig ist seine Gesamthöhe von 3,97 Metern, wodurch insbesondere dann logistische Schwierigkeiten entstehen können, wenn aufgrund von Platzmangel das seitliche Einblasen der Hackschnitzel nicht möglich ist. Für die Kippanhänger ist die größte Zahl von Nachteilen zu verbuchen, was sich speziell in der durchschnittlichen Befüllzeit von 1,63 Minuten je Schüttraummeter zeigt. Zudem offerieren diese Behälter nur ein relativ geringes Ladevolumen und erschweren das Rangieren durch ihre Lenkdeichsel-Ausführung.

Die unterschiedlichen Ladezeiten lassen vermuten, dass auch hinsichtlich der Dauer des Manipulierens der Fahrzeuge Differenzen auftreten. Diese sind teils erheblich und reichen von durchschnittlich 11 Minuten beim Rollbandwagen, 46 Minuten beim Schlepper mit zwei

Anhängern bis zu 54 Minuten pro Fuhre bei dem Gliederzug-Lkw mit Abrollcontainer (vgl. Tabelle 55), was in diesem Fall mehr als 20 Prozent der Arbeitszeit ausmacht. Bei der Betrachtung der Arbeitsabläufe fallen entsprechend Unterschiede auf, die die Abweichung der Zeiten zumindest in Teilen erklären.

Tabelle 55: Der durchschnittliche Zeitaufwand pro Tour für das Manipulieren der Fahrzeuge beim Hackguttransport als Ergebnis der Zeitstudie.

	N	\bar{x}	Min	Max.	S
Schlepper Rollbandwagen [min]	6	11	7	13	2,1
Schlepper zwei Anhänger [min]	8	46	11	97	35,1
Gliederzug-Lkw Abrollcontainer [min]	30	54	17	93	16,4

Wird, wie im vorliegenden Fall, ein Containerfahrzeug mit Anhänger als Transportmedium genutzt, ist in der Nähe der Hackung ein Rangierplatz notwendig. Sollte es möglich sein, dass der gesamte Zug am Hacker seitlich vorbeifahren kann und infolgedessen eine Beladung ohne Absetzen der Container vonstattengeht, kann die Notwendigkeit eines Rangierplatzes entfallen. In allen anderen Fällen erfolgt am vorgesehenen Ort das Abkoppeln des Anhängers, das Zugfahrzeug bewegt sich zum Hacker und der Container auf dem Zugfahrzeug wird befüllt. Anschließend setzt man den befüllten Container ab und überführt den leeren Behälter vom Anhänger auf das Zugfahrzeug. Nun kann auch dieser Container mit Material versehen werden, bevor er schlussendlich auf den Anhänger zurückgeschoben wird. Der zuerst befüllte Container wird vom Zugfahrzeug aufgenommen und der Anhänger angekoppelt (s. Abbildung 39). Der Vorgang des Umladens der Container und des An- beziehungsweise Abkoppelns des Anhängers gestaltet sich zeitaufwendig und wird beim Entladen erneut notwendig. Allerdings ist der Lkw ohne Anhänger leicht zu manövrieren und auch längere Rückwärtsfahrten sind unproblematisch. Wichtig ist, dass der Rangierplatz genügend Fläche zur Verfügung stellt und sich in unmittelbarer Nähe zum Hackplatz befindet, damit der Zeitverlust sich möglichst gering ausnimmt. Die Möglichkeit, die Heckklappen des Containers zu öffnen, sowie Schrägstellung und Ablassung offerieren den Arbeitern weitere Vorteile beim Beladen. Bisher fehlen eindeutige Erkenntnisse darüber, ab welcher Distanz zwischen Ort der Hackung und Verwendung der Hackschnitzel der Einsatz eines zweiten Containers sinnvoll ist. Bei geringer Transportentfernung sollte auf die Mitführung eines zweiten Containers verzichtet werden, um die Zeiten für das Manipulieren auf diese Weise zu reduzieren (vgl. Abbildung 39).

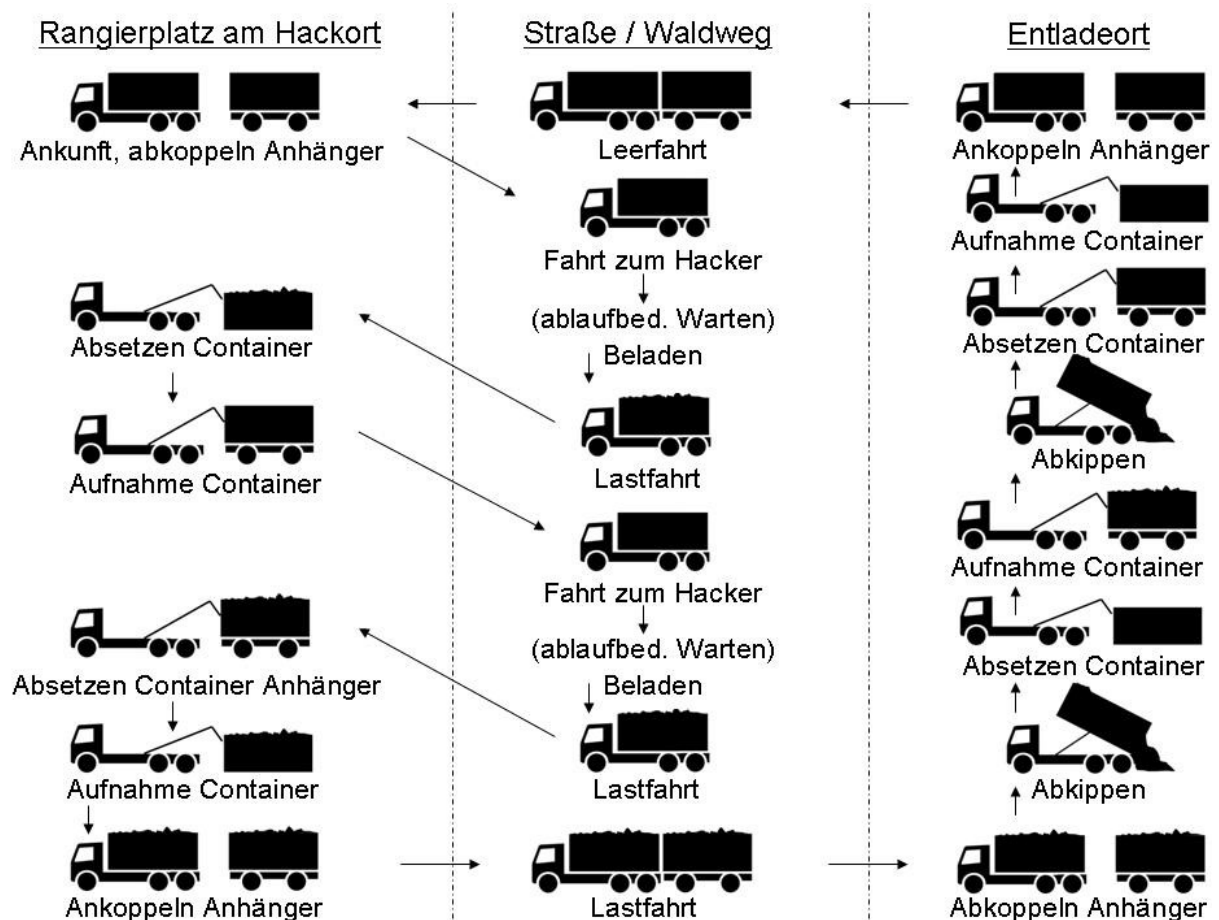


Abbildung 39: Exemplarischer Arbeitsablauf von einem Gliederzug-Lkw mit zwei Abrollcontainern beim Transport von Holzhackgut bei der mobilen Hackung.

Auch bei der Variante Schlepper mit zwei Anhängern ist ein Rangierplatz notwendig, außer es ist gewährleistet, dass das gesamte Gespann in Vorwärtsfahrt seitlich den Hacker zum Beladen passieren kann – ein äußerst seltener Fall. Ansonsten wird auch in dieser Situation auf dem Rangierplatz ein Anhänger abgekoppelt, während der zweite vom Hacker befüllt wird. Das Rangieren zeigt sich dann durch die Lenkdeichsel erschwert, sofern eine Rückwärtsfahrt notwendig wird. Anschließend wird der befüllte Anhänger am Rangierplatz abgestellt und der leere Anhänger angehängt. Sind beide Behälter mit Material beladen, führt man das Gespann am Rangierplatz erneut zusammen. Für die Rückwärtsfahrten und das Ankoppeln des zweiten Anhängers wird ein geübter Fahrer benötigt, der über ausreichend Fahr- und Rangierpraxis verfügt. In Bezug auf Rangierbarkeit und Spurtreue ist der Tridemrollbandwagen den beiden Zweiachsern am Schlepper vorzuziehen.

Bei einem Transport mit einem Rollband- beziehungsweise Abschiebewagen in Starrdeichselausführung findet kein Abkoppeln des Anhängers statt, was mit einer Zeitersparnis gleichzusetzen ist. Die Ausmaße der Anhänger²⁹ erfordern allerdings fahrerisches Können und Nervenstärke, besonders im öffentlichen Straßenverkehr, da das Gespann auf Fahrten auf dem Acker und infolgedessen auch auf Waldwegen ausgelegt ist. Aus diesem Grund ist

²⁹ Abmaße im Rahmen der Untersuchung: Länge 12 m; Breite 2,75 m; Höhe 3,97 m.

jedoch auch das Befahren unbefestigter Bereiche wie der Bankette ein Leichtes. Die Entleerung mit dem Rollband gestaltet sich besonders einfach. Im Gegensatz zum Kippen ist das Entladen somit auch auf geneigten Untergründen und an Orten, zum Beispiel Hallen, mit einer geringen Höhe möglich. Diese Variante ist somit die einzige der hier vorgestellten, bei der der Maschinenführer im Laufe des Prozesses, zumindest theoretisch, nicht von der Maschine absteigen muss. Eine Tatsache, die sich auch in den geringen Zeiten, die hier zum Manipulieren aufgewendet werden müssen, bestätigt. Bei den Zeitaufnahmen konnten sechs Fahren untersucht werden, bei denen das Manipulieren lediglich sieben bis 13 Minuten und damit circa sechs Prozent der Gesamtzeit andauerte.

5.2.7 Teilprozess Transport von Hackschnitzeln – Zeitverbrauch

Zur Vereinfachung wird ein Transport der Hackschnitzel durch Lkw mit Hakenliftgerät und Abrollcontainer, als Einzelfahrzeug oder Gliederzug, angenommen. Der Gesamtzeitverbrauch pro Tour (Z_{Tour}) setzt sich dabei aus der Fahrzeit (Z_{Fahr}), dem Zeitverbrauch an der Ladestelle für das Beladen (Z_{Lad}), Manipulieren der Container (Z_{Mani}) und Warten der Lkw (Z_W) sowie demjenigen für das Entladen (Z_{Entl}) zusammen. Somit ergibt sich Formel (7) zur Berechnung des Gesamtzeitbedarfs pro Tour.

$$Z_{Tour} = Z_{Fahr} + Z_{Lad} + Z_{Mani} + Z_W + Z_{Entl} \quad (7)$$

Da der Umfang der Datenaufnahmen nicht ausreichend ist für die Erstellung eines aussagekräftigen Fahrzeitmodells und zudem keinen Bestandteil der Aufgabenstellung dieser Arbeit darstellt, wird auf ein Modell aus der Fachliteratur zurückgegriffen. Hierfür eignet sich die logarithmische Gleichung (s. Formel (8)) von BROKMEIER (2013A) zur Bestimmung der Durchschnittsgeschwindigkeit in Abhängigkeit der Transportentfernung beim Kurzholztransport. Die Vorteile der Gleichung sind der hohe Stichprobenumfang ($N = 391$) bei der Datenaufnahme, der große Anwendungsbereich (7-396 km Transportentfernung) sowie die Modellgüte ($R^2 = 0,72$).

$$v = 11,31 + 10,274 \cdot \ln(dT) \quad (8)$$

Es gilt:

v	=	Durchschnittsgeschwindigkeit für eine Lkw-Tour inkl. Waldan- und -abfahrten [km/h]
dT	=	einfache Transportentfernung [km].

Durch die Berechnung der Geschwindigkeit nach Formel (8), lässt sich für jede Transportentfernung der Zeitverbrauch hinsichtlich des Fahrens (Z_{Fahr}) ermitteln, indem der Quotient aus der Transportentfernung und der Durchschnittsgeschwindigkeit gebildet wird (Formel (9)).

$$Z_{Fahr} = \frac{2 \cdot dT}{v} \quad (9)$$

Im Ganzen setzt sich beim Containertransport der gesamte Zeitverbrauch an der Ladestelle aus den Zeiten für den Beladevorgang (Z_{Lad}), für die Manipulation (Z_{mani}) und den Wartezeiten (Z_w) zusammen.

Für eine simplifizierte Darstellung wird angenommen, dass der Zeitverbrauch für das Laden der Schüttgutfahrzeuge in erster Linie von der Produktivität des mobilen Hackers ($L_{max}(H)$) abhängt, da das Holzhackgut direkt vom Hacker, beispielsweise durch ein Gebläse, in die Container befördert wird. Zudem bezieht sich der Zeitverbrauch auf das tatsächliche Ladevolumen der Fahrzeuge ($V_{IST}(Lkw)$). Der Zeitbedarf für das Beladen ergibt sich demnach aus Formel (10):

$$V_{IST}(Lkw) = \frac{V(Holz)}{N(Tour)} \rightarrow Z_{Belad}(Lkw) = \frac{V_{IST}(Lkw)}{L_{max}(H)} \quad (10)$$

Das tatsächliche Ladevolumen wird indirekt beeinflusst von dem maximalen theoretischen Ladevolumen ($V_{max}(Lkw)$) von Einzelfahrzeug oder Gespann, dem Füllungsgrad der Container (f_c) sowie der Schüttdichte der Hackschnitzel ($D(Holz)$), in Kombination mit der maximalen Nutzlast ($N_L(Lkw)$) der Fahrzeuge (s. Formeln (11) und (12)). Das maximal theoretische Ladevolumen wird benötigt, um erstens die Anzahl der Touren zu berechnen (s. Formel (13)), um daraus resultierend zweitens auf das tatsächliche Ladevolumen rückschließen zu können. Sofern der Quotient aus der Nutzlast vom Transportfahrzeug und der Schüttdichte der Hackschnitzel größer ist als das Produkt aus Containervolumen (V_c), der Containeranzahl (N_c) und dem durchschnittlichen Füllgrad der Container, zeigt sich der tatsächliche Füllumfang als der beschränkende Faktor für die Bestimmung des maximalen Ladevolumens.

$$\frac{N_L(Lkw)}{D(Holz)} \cdot 1000 > V_c \cdot N_c \cdot f_c \rightarrow V_{max}(Lkw) = V_c \cdot N_c \cdot f_c \quad (11)$$

Beim Transport von Holzhackschnitzeln mit einer hohen Schüttdichte, beispielsweise aufgrund eines erheblichen Wassergehalts im Holz, kann der Quotient aus Nutzlast vom Transportfahrzeug und der Schüttdichte der Hackschnitzel kleiner sein als das maximale Ladevolumen des Fahrzeugs, so dass die Nutzlast das maximale Ladevolumen vorgibt (Formel (12)).

$$\frac{N_L(Lkw)}{D(Holz)} \cdot 1000 < V(c) \cdot N(c) \cdot f(c) \rightarrow V_{max}(Lkw) = \frac{N_L(Lkw)}{D(Holz)} \cdot 1000 \quad (12)$$

Die Anzahl der notwendigen Touren (N_{Tour}) erhält man aus der Division der Gesamtmenge an zu erntendem Schlagabraum ($V(Holz)$) und dem maximalen Ladevolumen der Lkw. Um zu gewährleisten, dass sämtliches Material abgefahren wird, muss der so ermittelte Quotient stets auf eine ganze Zahl aufgerundet werden (Formel (13)).

$$\lceil \cdot \rceil \frac{V(Holz)}{V_{\max}(Lkw)} \geq N(Lkw) \rightarrow N(Tour) = \lceil \cdot \rceil \frac{V(Holz)}{V_{\max}(Lkw)} \quad (13)$$

Für den Fall, dass die Anzahl der für den Einsatz geplanten Lkw ($N(Lkw)$) größer ist als notwendig, beziehungsweise das Gesamtholzvolumen kleiner ist als das maximale Transportvolumen der einzelnen eingesetzten Lkw, ergibt sich die Anzahl der Fahren nach Formel (14):

$$\lceil \cdot \rceil \frac{V(Holz)}{V_{\max}(Lkw)} < N(Lkw) \rightarrow N(Tour) = N(Lkw) \quad (14)$$

Der Manipulationsvorgang ist notwendig, um die Container vom Anhänger auf das Zugfahrzeug zu heben oder um durch eine Rückwärtsfahrt zum Hacker zu gelangen. Der Zeitaufwand für das Manipulieren der Container hängt von den örtlichen Gegebenheiten und der Verwendung eines Einzelfahrzeugs oder eines Gliederzuges ab: Bei ausreichend Platz vor Ort kann der gesamte Zug seitlich neben dem Hacker rangieren und beladen werden, ohne die Container absetzen zu müssen. Unter normalen Bedingungen ist aufgrund der schmalen Waldwege das aneinander Vorbeifahren von Hacker und Lkw nicht denkbar, so dass an einem in der Nähe befindlichem Rangierplatz der Anhänger abgehängt und die Container getauscht werden müssen (vgl. Abbildung 39). Im ungünstigsten Fall muss der Lkw, um den Hacker zu erreichen, eine lange Strecke in Rückwärtsfahrt zurücklegen und der Hacker seinen Arbeitsplatz verlassen, so dass der Lkw passieren kann. Der größte Anteil an Rangierarbeit durch den Lkw wird in dieser Situation verrichtet. Die in der Modellrechnung verwendeten Zeiten sind unter Berücksichtigung der örtlichen Gegebenheiten in Tabelle 56 aufgeführt.

Tabelle 56: Zeitverbrauch für das Manipulieren von Fahrzeug und Container eines Einzelfahrzeugs oder eines Gliederzuges je Fuhre bei unterschiedlichen Platzverhältnissen am Ort der Hackung.

	Platzverhältnisse		
	Gut [min/Fuhre]	Mittel [min/Fuhre]	Schlecht [min/Fuhre]
Solofahrzeug	6	18	30
Gliederzug	12	54	72

Die Wartezeit für die Container-Lkw ist abhängig von der Leistung des Hackers sowie von der Fahrtzeit der einzelnen Transportfahrzeuge; nach WITTKOPF (2005) errechnet sich diese durch Subtraktion des Zeitbedarfs für eine Tour (Z_{\min}) ohne Warten, von dem Produkt aus der Anzahl zeitgleich eingesetzter Lkw und der Zeit für das Laden eines Lkws. Die kalkulierte theoretische Wartezeit wird in Stunden je Tour angegeben und kann mit Hilfe der Formel (15) ermittelt werden:

$$Z_w = N(Lkw) \cdot Z_{Lad} - Z_{\min} \quad (15)$$

Es gilt: $Z_{\min} = Z_{Fahr} + Z_{Lad} + Z_{mani} + Z_{Entl}$

Der Zeitverbrauch für das Entladen wird ebenfalls pauschal angesetzt, da von gleichbleibend guten Voraussetzungen ausgegangen wird, und umfasst das Öffnen und Schließen der Containerklappen sowie das Kippen und Wechseln der Container. Der präzise Zeitverbrauch ist dabei nahezu unabhängig vom Volumen der mitgeführten Ladung und wird anhand der Ergebnisse aus den Untersuchungen in Kapitel 5.2.4 auf 25 Minuten festgelegt (s. Tabelle 57). Wartezeiten an der Entladestelle sind hierbei nicht eingerechnet.

Tabelle 57: Zeitverbrauch Abrollkipper-Lkw: Be- und Entladung.

D_a	Leistungsdaten Be-/ Entladung	Abrollkipper
27.	Zeitverbrauch Ladevorgang	Formel (10)
28.	Zeitverbrauch Entladevorgang	20 min
29.	Zeitverbrauch Ladestelle ges.	$Z_{Lad} + Z_{mani} + Z_w$
30.	Zeitverbrauch Entladestelle ges.	25 min

Die durchschnittliche Produktivität oder Leistung der Container-Lkw je Zeiteinheit ($L(Lkw)$) kann auf Basis der bisher ermittelten Zeitverbräuche und der Anzahl der durchgeführten Touren unter Berücksichtigung der Gesamtholz mengen nach Formel (16) kalkuliert werden.

$$L(Lkw) = \frac{V(Holz)}{N(Tour)} \cdot \frac{1}{Z_{Tour}(Lkw)} \quad (16)$$

5.2.8 Teilprozess Transport von Hackschnitzeln – Kosten

Zur Abschätzung der Kosten beim Lkw-Transport sind zunächst einige Berechnungen anzustellen, die als Grundlage für viele Positionen der Kostenkalkulation dienen und exemplarisch in Tabelle 58 dargestellt werden. Die durchschnittlich gefahrenen Autobahnkilometer ($d_A(Lkw)$) erweisen sich als entscheidend für die Kalkulation der Mautkosten und werden in Abhängigkeit zur einfachen Transportentfernung (dT) anhand der von BROKMEIER (2013A) erstellten Gleichung (Formel (17)) ermittelt:

$$d_A(Lkw) = 0,00184 \cdot dT^2 + 0,20334 \cdot dT - 4,1 \quad (17)$$

Der Kraftstoffverbrauch ergibt sich aus der Berechnung der unterschiedlichen Wegstrecken beziehungsweise der Zeiten für den Lkw-Betrieb außerhalb der Fahrtzeit und den vorgegebenen Durchschnittsverbräuchen (s. Tabelle 24 u. Tabelle 25).

Tabelle 58: Kostenkalkulation Abrollkipper-Lkw und Kurzholzzug: Berechnungen.

E_a, E_k	Berechnungen	Ø Tour	Individuell
31.	Einfache Transportentfernung	120 km	50 km
32.	Anteil Autobahnfahrt	154,8 km/Tour	29,5 km
33.	Kraftstoffverbrauch	95,8 l/Tour	43,3 l/Tour
34.	Mittlere Geschwindigkeit	60,5 km/h	51,5 km/h
35.	Zeitverbrauch	316,5 min/Tour	194,3 min

Die Kosten für eine Tour können letztlich in zeitabhängige und fahrleistungsabhängige Aufwendungen pro Betriebsstunde aufgeteilt werden. Erstere ergeben sich aus der Division der jährlichen Fixkosten durch die Anzahl der jährlichen Einsatzstunden. Die Kostenpositionen Abschreibungen und Wartung respektive Reparaturen werden dabei anteilig in fixe und variable Kosten untergliedert (BORCHERDING, 2007). Tabelle 59 liefert einen Überblick über die jährlich anfallenden feststehenden Ausgaben für die betrachtete Transportalternative und Hinweise zu den Berechnungen der einzelnen Positionen.

Tabelle 59: Kostenkalkulation Abrollkipper-Lkw: Ergebnis Fixkosten.

F_a	Fixkosten	Abrollkipper
36.	Kalk. Abschreibung $(A_{a1}-A_{a3}-A_{a6}) / A_{a2} * 0,5$	9.936 €/a
37.	Kalkulatorische Zinsen $((A_{a1}+A_{a3})/2+B_{a12}) * B_{a13}$	5.760 €/a
38.	Kfz-Steuer KraftStG, 2012	1.534 €/a
39.	Versicherungen Bodelschwingh, 2005	7.200 €/a
40.	Kommunikation Bodelschwingh, 2005	600 €/a
41.	Personal $(C_{a22}+C_{a23}+C_{a24}) * C_{a26}$	58.560 €/a
42.	Rep., Wartung (40 %) $B_{a14} * (A_{a1}-A_{a3}) / A_{a2} * 0,4$	4.584 €/a
43.	Verwaltungskosten GVE, 2013	15.000 €/a
44.	Fixkosten gesamt	Σ 102.574 €/a
45.	F_{a44}/B_{a10}	41,58 €/BS

Die variablen Kosten entstehen ausschließlich durch den Betrieb der Maschinen. Bei deren Stillstand fallen keine variablen Ausgaben an, somit sind die genannten Kosten beim Lkw-Betrieb die distanzabhängigen Kosten, die die Fahrt eines Lkws nach sich zieht. Dabei muss der Anteil der Abschreibungs- und Reparaturkosten zwischen den fixen und variablen Kosten gutachterlich festgelegt werden. Ausgaben für Betriebsstoffe, Maut und Reifen hingegen entstehen ausschließlich innerhalb der variablen Kosten. Mit Hilfe der Eingangsdaten (vgl. Tabelle 24 u. Tabelle 25) wird versucht, eine möglichst realistische Kalkulation vorzunehmen.

Tabelle 60: Kostenkalkulation Abrollkipper: Ergebnis Variable Kosten.

G_a	Variable Kosten Abrollkipper	Ø Tour	Individuell
46. Kalk. Abschreibung	$(A_{a1}-A_{a3}-A_{a6}) / A_{a2} \cdot 0,5$	0,07 €/km	7,04 €/Tour
47. Rep., Wartung (60 %)	$B_{a14} \cdot (A_{a1}-A_{a3}) / A_{a2} \cdot 0,6$	0,07 €/km	6,88 €/Tour
48. Betriebsstoffe	$E_{a33} \cdot B_{a16} \cdot (1+B_{a15})$	0,43 €/km	52,28 €/Tour
49. Maut	$B_{a17} \cdot E_{a32}$	0,20 €/km	4,58 €/Tour
50. Reifen	$A_{a6}/A_{a5}/A_{a4}$	0,03 €/km	2,84 €/Tour
51. Variable Kosten gesamt	Σ	0,79 €/km	73,61 €/Tour

5.2.9 Übersicht Zerkleinerung im Wald

Mit Hilfe der Ergebnisse aus den Teilprozessen kann die Kalkulation für die gesamte Bereitstellungskette vorgenommen werden. Tabelle 61 zeigt die Zusammenfassung der einzelnen Resultate beziehungsweise die möglichen Rechenschritte.

Tabelle 61: Übersicht Modell Bereitstellungskettenvergleich – Zerkleinerung im Wald (B = Bündeln; R = Rücken; T = Ferntransport; Z = Zerkleinerung; S = Siebung).

Bereitstellungskette Zerkleinerung im Wald	
B	---
R	$k(R_1) = \frac{V(Holz)}{L = 20 SRm / MAS \cdot \text{Korrekturfaktor Ruckeentf. Tabelle 46}} \cdot \frac{89 €}{MAS}$
Z	$k(Z_1) = \text{Formel(1)} \cdot \left(k_{var} \text{ Tabelle 49} + \frac{153.000 €/a}{j} \right) + (\text{Formel(4)} \vee \text{Formel(5)}) \cdot \frac{153.000 €/a}{j}$
T	$k(Lkw_1) = \text{Formel(12)} \cdot (\text{Formel(6)} \cdot 41,58 € / MAS + d_T \cdot 2 \cdot 0,79 € / km)$
S	$k(S_2) = \frac{V(Holz)}{L = 85,2 SRm / MAS} \cdot \frac{45,72 €}{MAS}$
Σ	$K_1 = k(R_1) + k(Lkw_1) + k(Z_1) + k(S_1)$

Hier gilt:

- $V(Holz)$ = Gesamtholzvolumen der Erntemaßnahme [SRm]
- L = Leistungskennwert der einzelnen Betriebsmittel
- k = Kalkulierte Kosten für den Betriebsmitteleinsatz [EUR/MAS]
- k_{var} = Kalkulierte variable Kosten [EUR/km]
- j = Jährlicher Einsatzzumfang [MAS/a]
- d_T = Einfache Transportentfernung [km]
- K_1 = Gesamtkosten Zerkleinerung im Wald

Durch das Kalkulationsmodell kann eine kosten- und ablaufoptimierte Abstimmung der Teilprozesse Zerkleinerung und Transport erreicht werden. Einige Parameter des Modells, die sich durch die Fallstudien der vorangegangenen Kapitel ergeben, werden exemplarisch eingesetzt und können durch individuelle Werte ersetzt werden. Hierzu zählen insbesondere die kalkulierten Stundenkostensätze sowie die Leistungskennwerte der einzelnen Betriebsmittel. Von Bedeutung sind die individuellen Berechnungen zum Zeitverbrauch beim Zerkleinern

und Transportieren der Hackschnitzel, da hierbei auch ablaufbedingte Wartezeiten berücksichtigt werden.

Auswahlmöglichkeiten gibt es bei den zur Verfügung stehenden Transportkapazitäten (Anzahl Lkw; vgl. Formel (13), (14)) sowie der Ausstattung der Fahrzeuge mit Anhänger, wodurch die Nutzlast und damit das maximal mögliche Ladevolumen pro Tour gesteigert wird (vgl. Formel (12)).

5.3 Bereitstellungskette Zerkleinerung am Werk

5.3.1 Teilprozess Bündeln - Technische Arbeitsproduktivität

Auf den insgesamt 39 untersuchten Flächen kann die Produktion von 16520 Bündeln dokumentiert werden. Bei einem Großteil der analysierten Gebiete (33 Flächen, 12449 Bündel) handelt es sich ausschließlich um Bestände, die der Windwurf Kyrill stark beeinträchtigte.

In der Literatur werden uneinheitliche Einflussfaktoren auf die Produktivität beim Bündeln genannt. Anhand der aufgenommenen Parameter in dieser Untersuchung kann deren Beeinflussung auf die Leistung einzeln betrachtet und somit konkretisiert werden. Da ein enger Zusammenhang zwischen der geernteten Rundholzmenge und dem Anfall an Restholz auf der Fläche besteht (vgl. Tabelle 62), liegt die Vermutung nahe, dass ein Konnex zwischen der geernteten Rundholzmenge und der Produktivität beim Bündeln besteht. Untersucht man die Korrelation der beiden Parameter, wird mittels des Korrelationskoeffizienten deutlich, dass nur ein geringer, negativer Zusammenhang existiert, der statistisch nicht nachgewiesen werden kann (s. Tabelle 62). Gleiches gilt für die Flächengröße eines Hiebs und die Produktivität beim Bündeln. In beiden Fällen ist auch durch die Durchführung einer Rangkorrelationsanalyse nach SPEARMAN keine Wechselbeziehung der Variablen ersichtlich. In weiteren Studien (u. a. VESISENAHO ET AL., 2007; NOLTE ET AL., 2005) wird der Massenankfall des Schlagabbaus als ausschlaggebend für die Produktivität des Bündlers angesehen. Durch den statistisch signifikanten, linearen Zusammenhang zwischen der Anzahl geernteter Bündel, damit auch dem Massenankfall an erntebarem Schlagabraum je Hektar und der Produktivität beim Bündeln kann die vorliegende Arbeit diese These bestätigen. Da allerdings mit 126 Bündeln pro Hektar ein relativ hoher durchschnittlicher Massenankfall gegeben ist, kann der Bereich mit einem geringen Massenankfall hier nicht abgedeckt werden.

Tabelle 62: Korrelationskoeffizienten (nach PEARSON) zwischen einzelnen untersuchten Parametern.

Untersuchung	Cor (r)
Geerntete Rundholzmenge [Efm/ha] vs. Produktivität [St./BS]	-0,128
Flächengröße [ha] vs. Produktivität [St./BS]	0,205
Volumenankfall [St./ha] vs. Produktivität [St./BS]	0,494 (*)
Zopfdurchmesser [cm] vs. Produktivität [St./BS]	0,560 (*)
Geerntete Rundholzmenge [Efm/ha] vs. Massenankfall [St./ha]	-0,545 (*)

* Die Korrelation ist auf dem Niveau von 0,05 (2-seitig) signifikant.

Wie das Ergebnis der Korrelationsanalyse (vgl. Tabelle 62) weiter zeigt lässt auch der Zopfdurchmesser bei der Stammholzaushaltung einen Einfluss auf die Produktivität im Rahmen der Bündelherstellung auf den untersuchten Flächen erwarten. Mit zunehmendem Zopfdurchmesser steigt die Produktivität. Die Korrelationsanalyse zeigt eine große Effektstärke, die sich mit einer Fehlerwahrscheinlichkeit von weniger als fünf Prozent als statistisch signifikant darstellt.

Der Einfluss der Geländeneigung auf die Leistungsfähigkeit ist erheblich: Die Mittelwerte der Produktivität unterscheiden sich signifikant (s. Tabelle 63) und nehmen mit zunehmender Geländeneigung ab. Der SPEARMANSCHKE Rangkorrelationskoeffizient verdeutlicht zudem eine starke, negativ gerichtete Beziehung der beiden Variablen ($R = -0,68$).

Tabelle 63: Einfluss der Geländeneigung auf die Produktivität beim Bündeln von Restholz. Die vier Faktorstufen (Geländeneigung) weisen signifikante Unterschiede auf (Signifikanzniveau: $\alpha = 0,05$).

Geländeneigung [Stufe]	Messungen [N]	\bar{x} [St./BS]	s^2 [St./BS]
1 (bis 10 Grad)	13	11,9	9,29
2 (bis 15 Grad)	4	9,6	5,35
3 (bis 20 Grad)	5	7,9	4,83
4 (maximal)	6	6,5	3,65
	FG	F-Wert	P
ANOVA	3	6,774	0,002

In weiteren Untersuchungen zur Produktivität beim Bündeln wird die Arbeitsvorbereitung als wesentlicher Einflussfaktor auf die Leistungsfähigkeit der Großgeräte gefasst (u. a. VESISEN-AHO ET AL., 2007; KÄRHÄ ET AL., 2006; KÄRHÄ ET AL., 2004). Zu diesen Präparationen zählt in erster Linie die Verhinderung von Verschmutzung durch Überfahung der Äste und Kronen, so dass eine weitere Nutzung des Schlagabtraums gewährleistet werden kann und eine Vorkonzentration des Materials.

Im Rahmen der Hiebsprotokolle können zwei wesentliche Arbeitssysteme unterschieden werden: Zum einen erfolgt die Stammholzaufarbeitung im vollmechanisierten System mit Harvester und maschineller Rückung und zum anderen im hochmechanisierten System durch motormanuelle Fällung, Aufarbeitung und ebenfalls anschließender maschineller Rückung. Bei beiden Systemen gestaltet sich eine Einkürzung der Baumkrone aus Waldschutzgründen als denkbar. Um die Wipfelstücke unbrauchbar für rindenbrütende Insekten zu machen, werden diese in mehrere Stücke geteilt, was bewirken soll, dass ein schnelleres Austrocknen der Baumkronen vonstattengeht. Gleichzeitig erhöht sich durch dieses Vorgehen allerdings auch die Stückzahl der einzusammelnden Baumreste, woraus eine Verschlechterung im Sinne des Stück-Volumen-Gesetzes resultiert. Diese Grundregel bei der Holzernte besagt, dass die Produktivität bei der Holzernte mit zunehmendem Volumen des Einzelstücks ebenfalls steigt.

Bei der Aufarbeitung durch Harvester kann das Restholz darüber hinaus noch, ähnlich den Standardsortimenten, entlang der Rückegasse separat abgelegt und vorkonzentriert werden. Die Hiebsprotokolle legen eine Einflussnahme der Erntemethode auf die Produktivität beim Bündeln nahe, was sich insbesondere bei den vom Harvester bearbeiteten Flächen offenbart (s. Tabelle 64). Die höchste Produktivität erreichen die Flächen, bei denen der Harvester die Wipfel lang lässt und vorkonzentriert (Gruppe B). Die dagegen schlechteste Bilanz erzielt der

Bündler, wenn die Baumkronen eingekürzt, aber dennoch auf Raubergen aufgeschüttet werden (Gruppe A), da sich in diesen Fällen die kurzen Holzstücke verkeilen und unterschiedlich ausrichten. Folge ist, dass das Astmaterial nicht gleichgerichtet dem Bündelaggregat zugeführt werden kann, was Störungen im Prozess nach sich führt. Die verschiedenen Behandlungsmethoden des Schlagabraums durch den Harvester besitzen auch eine statistisch signifikante Einflussnahme auf die Bilanz der Bündler. Mit Hilfe der Varianzanalyse kann gezeigt werden, dass sich die Mittelwerte der Produktivität innerhalb der vier Behandlungsvarianten mit einer Fehlerwahrscheinlichkeit von weniger als fünf Prozent unterscheiden.

Tabelle 64: Einfluss der unterschiedlichen Vorgehensweisen bei der hochmechanisierten Ernte des Stammholzes auf die Produktivität beim Bündeln von Restholz. Die vier Faktorstufen (Erntemethode: A, B = Wipfel vorkonzentriert) weisen signifikante Unterschiede auf (Signifikanzniveau: $\alpha = 0,05$).

Erntemethode [Gruppe]	Messungen [N]	\bar{x} [St./BS]	s^2 [St./BS]
A (Wipfel kurz)	7	5,8	3,99
B (Wipfel lang)	7	13,9	22,55
C (Wipfel kurz)	4	9,1	1,08
D (Wipfel lang)	2	10,1	1,39
	FG	F-Wert	P
ANOVA	3	7,101	0,003

Bei der motormanuellen Aufarbeitung wird in den Hiebsprotokollen lediglich unterschieden, ob die Baumkronen aus Gründen des Waldschutzes weiter eingeschnitten werden oder nicht. Zwar ist der Mittelwert der Produktivität beim Bündeln der nicht geteilten Kronen mit 11,1 Bündeln pro Betriebsstunde geringfügig höher als bei den zerteilten Kronen (9,8 St./BS), allerdings kann man mit Hilfe der Überprüfung durch einen t-Test keinen statistisch eindeutigen Unterschied ausmachen.

Auffällig ist im Rahmen der betrachteten Fallstudien die höhere Produktivität beim Bündeln jenseits der Kyrillflächen (bei allen sechs Flächen ist das Arbeitssystem auf die Verwendung des Schlagabraums abgestimmt). Mit etwa 18,5 Bündeln pro Betriebsstunde übersteigt der Wert den Durchschnitt aus den übrigen Kyrill beeinflussten Flächen (s. o.) deutlich.

Mit Hilfe der schrittweisen multiplen Regression (s. Kapitel 3.7.2) soll ein Modell erstellt werden, anhand dessen die Produktivität beim Bündeln, als abhängige Variable, in Abhängigkeit von den bei der hiebsweisen Leistungsaufzeichnung ermittelten unabhängigen Größen berechnet wird. Während dabei die meisten Variablen als metrisch in ihrer vorliegenden Form in die Regression aufgenommen werden können, wird die Erntemethode bei der dem Bündeln vorangegangenen Stammholzernte als nominal skalierte Variable mit Hilfe von sogenannten Dummy-Variablen (vgl. BORTZ, 1999; Tabelle 14) in die Regression integriert.

In die Berechnung des Produktivitätsmodells gehen die 33 betrachteten Fälle ein, bei denen vollständige Hiebsprotokolle vorliegen. Im Rahmen der schrittweisen Regression wird ersicht-

lich, dass die Geländeneigung, der Rundholzanfall, der Zopfdurchmesser und der quadrierte Zopfdurchmesser³⁰ als signifikante Variablen in das Modell einfließen müssen. Darüber hinaus bleibt zu berücksichtigen, ob die Vorbehandlung nach der Erntemethode B (Aufarbeitung durch Harvester, Wipfel lang, vorkonzentriert) erfolgte oder ob dies nicht der Fall war (vgl. Tabelle 2.1-15 im Anhang). Unberücksichtigt bleiben im Modell die Flächengröße und der Restholzanfall je Hektar, obwohl bei der isolierten Untersuchung ein relativ ausgeprägter Zusammenhang zwischen der Produktivität von Bündlern und dem Restholzanfall pro Hektar zu bestehen scheint (s. Tabelle 62). Offensichtlich findet allerdings eine Überlagerung dieser Variable durch das Gewicht der übrigen, erklärungsstärkeren Größen statt, so dass der Restholzanfall nicht mehr als signifikanter Faktor in das multiple Geschehen eingreift. Zwar sind die ausschlaggebenden Variablen der schrittweisen Regression nicht grundsätzlich die bestmöglichen Einflussgrößen, jedoch wurde in der vorliegenden Situation eine praktische Überprüfung vorgenommen, die die theoretischen Annahmen verifiziert. Demnach wird dem Restholzanfall bereits über den Rundholzanfall, der als signifikante Variable in das Modell einfließt, Rechnung getragen (vgl. Kapitel 5.3.1.; Tabelle 62).

Mit diesem Modell können etwa zwei Drittel der gesamten Streuung erklärt werden, was durch das mit 0,735 vergleichsweise hohe Bestimmtheitsmaß (0,665 korrigiertes R^2) ersichtlich ist. Dabei verdeutlicht es auch den unterschiedlichen Erklärungsgehalt der jeweiligen Variablen: So gibt die Geländeneigung bereits Aufschluss über etwa 40 Prozent der gesamten Streuung, jedoch kann auch dem Rundholzanfall und dem Zopfdurchmesser beziehungsweise dem quadrierten Zopfdurchmesser ein signifikanter Einfluss zugewiesen werden, der allerdings im Gegensatz zur Geländeneigung einen deutlich geringeren Anteil ausmacht.

Die standardisierten Residuen sind näherungsweise normalverteilt und ihre Varianz für alle Ausprägungen nicht signifikant unterschiedlich (Homoskedastizität), so dass augenscheinlich keine gravierenden Modellvoraussetzungen verletzt werden. Infolgedessen lautet das Modell zur Berechnung der Produktivität von Bündlern auf Kahlschlagflächen nach Windwurf wie folgt (Formel (18)):

$$L(B) = -0,235 \cdot Zopf^2 + 5,785 \cdot Zopf - 1,335 \cdot Neig - 0,008 \cdot Efm + 2,421 \cdot B - 17,936 \quad (18)$$

Es gilt:

$L(B)$	=	Leistungskennwert Bündeln / Produktivität [St./BS]
$Zopf$	=	Mindestzopfdurchmesser [cm]
$Neig$	=	Maximale Geländeneigung [Stufen]
Efm	=	Rundholzanfall je Hieb [Efm/ha]
B	=	Erntemethode Harvester, vorkonzentriert, Wipfel lang [Dummy-Variable; nimmt bei Holzernte mit Harvester und Vorkonzentration der lang gelassenen Zopfstücke den Wert 1, ansonsten den Wert 0 an].

³⁰ Der quadrierte Zopfdurchmesser wird in die Analyse einbezogen, weil das Modell infolgedessen einen praxisnahen Verlauf annimmt. Vergleichbare Vorgehensweisen finden sich auch bei Produktivitätsmodellen von Harvestern, in denen der Zusammenhang zwischen Brusthöhendurchmesser der zu erntenden Bäume und der Produktivität eines Harvesters ebenfalls einen quadratischen Bezug aufweist (s. CREMER, 2008; HEIDE ET AL., 2005; PAUSCH ET AL., 2002).

Die durchschnittliche Produktivität beim Bündeln ergibt sich demnach durch Anwendung des erstellten Produktivitätsmodells (Formel (18)), das auf Basis der Hiebsprotokolle von Bündlereinsätzen auf Windwurfflächen entstanden ist. Da die Effektivität in anderen Studien höher angegeben wird und auch die Versuchseinsätze außerhalb von Kyrill ein besseres Ergebnis aufweisen, kann bei der Anwendung des Bereitstellungskettenvergleichs (s. Kapitel 5.3) bei der Festlegung der Eingangsdaten als Einsatzgebiet für den Bündler neben ‚*Windwurfflächen*‘ auch ‚*Normal*‘ angenommen werden. Dadurch steigert sich die errechnete Produktivität um den Faktor zwei, was in etwa dem Quotienten aus den Effektivitätsangaben der Fachliteratur und den eigenen Ergebnissen im Rahmen der Hiebsprotokolle entspricht.

5.3.2 Teilprozess Bündeln - Kosten

In der Arbeitswissenschaft sind Zeitstudien eine gern genutzte, bewährte Untersuchungsmethode, so auch im Rahmen der ausgewerteten Veröffentlichungen. Durch diese Art der Analyse lässt sich der Grad der Produktivität präzise erfassen; um jedoch Rückschlüsse auf die Produktionskosten beim Bündeln ziehen zu können, müssen darüber hinaus die spezifischen Maschinenkosten bekannt sein. Die Ermittlung gestaltet sich schwierig, da sie nicht nur vom verwendeten Maschinentyp, sondern im Wesentlichen von den individuellen betrieblichen Rahmenbedingungen abhängen. Die logische Konsequenz ist daher eine große Spannweite der angegebenen Betriebskosten (in Euro pro MAS ohne Umsatzsteuer) in der Literatur: Der niedrigste angegebene Stundensatz beläuft sich auf 93,60 und der maximale liegt bei 155,10 Euro pro MAS (s. Tabelle 65). Allein dieser Umstand erschwert eine Gegenüberstellung der angegebenen Produktionskosten innerhalb der verschiedenen Studien.

Bei der Auswertung der Produktionskosten von Bündeln können 15 Studien aus Deutschland (N = 8), Finnland (N = 1), Litauen (N = 1), Australien (N = 1) und den USA (N = 4) herangezogen werden. Die Produktionskosten ergeben sich aus einer vollständigen Abhängigkeit zu den Maschinenkosten und der Produktivität in den einzelnen Studien. Länderübergreifend wird ein Mittelwert von 6,90 Euro pro Bündel für die Herstellung angegeben, wobei die Angaben insgesamt stark variieren. So liegt der günstigste Wert bei 4,19 Euro, die höchsten Produktionskosten misst eine australische Studie mit mehr als dem vierfachen Wert (17,78 Euro/St.; vgl. Tabelle 65). Bei diesen beiden Extremen handelt es sich allerdings um Ausreißer; nichtsdestotrotz weisen die Werte eine deutliche Varianz von 6,20 Euro auf.

Bei den in Deutschland erhobenen Studien pendelt der angegebene Betriebskostensatz für Bündlermaschinen zwischen 118 und 150 Euro pro MAS. Legt man die durchschnittliche Produktivität im Rahmen der acht Untersuchungen zugrunde und geht von einem mittleren Stundensatz in Höhe von 134 Euro pro MAS aus, ergeben sich für die Produktion eines Bündels durchschnittlich 6,70 Euro (Details s. Tabelle 2.1-9 im Anhang).

Tabelle 65: Spezifische Maschinenkosten für Bündler in unterschiedlichen Ländern aus Literaturverweisen.

Nr.	Land	Maschine	Kosten [EUR/MAS]
1	Deutschland	Fiberpac / TJ 1490D	118,00
2	Deutschland	Fiberpac / MAN TGA 33.480	128,00
3	Finnland	Fiberpac / TJ 1490D	100,80
3	Finnland	Pinox 330 / Pinox 828	96,00
3	Finnland	WoodPac / Valmet 860	93,60
4	USA	Fiberpac / TJ 1490D	155,10 ³¹
5	Litauen	Pinox 330 / Pinox 828	100,00
6	Deutschland	Fiberpac / MAN TGA 33.480	128,00
12	Deutschland	Pinox 330 / Pinox 828	150,00
12	Deutschland	Fiberpac / MAN TGA 33.480	130,15
13	Australien	Pinox 330 / Pinox 828	208,00 ³²

Die Garnkosten schlagen mit 2,50 Euro pro Betriebsstunde zu Buche und sind, obwohl das Produkt bei keiner anderen Forstmaschine Verwendung findet, nicht zu vernachlässigen. Fremdleistungen fallen im Bereich des Maschinentransports an: Ab einer Transportentfernung von circa 10 Kilometern erfolgt die Beförderung per Tieflader, da zum einen die Maschinen nicht für die Fahrt von langen Strecken ausgelegt sind und Schaden nehmen können, zum anderen stellt diese Form des Transportes bei größeren Entfernungen auch eine günstigere Alternative zur Bewegung auf eigener Achse dar (BODELSCHWINGH, 2005). Die Maximalgeschwindigkeit der Maschine beläuft sich auf 20 Kilometer pro Stunde. Der Kraftstoffverbrauch ist mit durchschnittlich circa 11 Litern pro Stunde im höheren Niveau für Forwarder anzusiedeln; für Vollernter hingegen liegt der Verbrauch deutlich unter dem zu erwartenden Durchschnitt.

Zur Berechnung der Kosten des Bündlereinsatzes im Rahmen des Bereitstellungskettenvergleichs wird zwischen einem Forwarder und einer Kombimaschine als Trägerfahrzeug unterschieden. Da bei der Produktivitätsermittlung kein signifikanter Unterschied zwischen den Trägerfahrzeugen nachgewiesen werden konnte, übt die Auswahl lediglich Einfluss auf die Maschinenkosten aus. Der kalkulierte Stundensatz für einen Forwarder mit Bündler beläuft sich auf 115 Euro (s. Tabelle 1.1-4 u. 2.1-19 im Anhang) und derjenige für eine Kombimaschine mit Bündler auf 132 EUR je MAS (s. Tabelle 2.1-19 im Anhang).

³¹ Entspricht 200,07 \$ US. Dollarkurs am 10.10.2012: 1 EUR = 1,29 \$ US.

³² Entspricht 280,00 \$ AUS. Dollarkurs am 10.05.2011: 1 EUR = 1,35 \$ AUS.

5.3.3 Teilprozess Bündelrückung

Für das Vorliefern von Restholzbündeln aus dem Bestand an die Waldstraße eignen sich grundsätzlich alle gängigen Tragschleppermodelle. Im Rahmen der Versuchsreihe können die Selbstaufschriebe von fünf Fahrern mit drei unterschiedlichen Maschinen, davon sind zwei Fahrzeuge modell- und baugleich (s. Abbildung 26; Kapitel 3.3.2), ausgewertet werden.

Tabelle 66: Die Produktivität beim Rücken von Bündeln als Ergebnis der Auswertung von Leistungsaufschrieben (Signifikanzniveau: $\alpha = 0,05$).

Maschine [Bez.]	Σ Tage [N]	\bar{x} TAP [St./BS]	S TAP [St./BS]
818	23	41,3	17,61
1019	6	49,4	13,76
1021	17	26,8	10,79
	FG	F-Wert	P
ANOVA	2	8,374	0,001
	FG	t-Wert	P
818 vs. 1019	27	-1,055	0,301
1019 vs. 1021	21	-4,441	0,000

Insgesamt ist ein arithmetisches Mittel von 36 gerückten Bündeln je Betriebsstunde an den 46 Einsatztage zu konstatieren. Mit einer Gesamtanzahl von 12685 gerückten Bündeln und einem Zeitbedarf von 329 Betriebsstunden liegt das nach der Anzahl der Bündel je Hieb gewichtete Mittel bei etwa 39 Bündeln je Betriebsstunde. Dabei ist ein deutlicher Leistungsunterschied zwischen den Maschinen festzustellen: Die höchste Produktivität erreicht eine Kombimaschine mit einem drehbaren Rungenkorb und einer Effektivität von im Durchschnitt 49 Bündeln je Betriebsstunde. Nach Aussage der Maschinenführer ist der drehbare Rungenkorb bei den Kombimaschinen ein deutlicher Vorteil, denn dieser kann so positioniert werden, dass man auf die Stirnflächen der Bündel schaut. Ein leichtes Auseinanderhalten des Materials ist nun möglich, so dass man nicht unbeabsichtigt in ein Bündel greift, das auf der Ladefläche verbleiben soll. Verwendet das Fahrzeug einen Drehkranz, ist allerdings auch die Ladefläche der Spezialmaschine höher aufgebaut, wodurch sich die Ladekapazität hinsichtlich des Ladevolumens deutlich geringer als beim eingesetzten Standardtragschlepper ausnimmt und der Schwerpunkt erhöht. Dennoch erreicht in diesem Fall die Kombimaschine eine 20 Prozent höhere Leistung als der einfache Tragschlepper. Dass dieser Leistungsunterschied nicht allein auf die Bauart bedingten Vorteile der Kombimaschine zurückzuführen ist, zeigt der Vergleich mit einer weiteren im Untersuchungskorpus enthaltenen Kombimaschine: Sie schneidet mit circa 27 Bündeln je Betriebsstunde deutlich schlechter ab. Der Unterschied zwischen den drei Maschinen kann mit Hilfe der einfaktoriellen Varianzanalyse auch statistisch nachgewiesen werden: Der t-Test verdeutlicht, dass zwischen den beiden Kombima-

schinen (1019 vs. 1021) ein signifikanter Unterschied vorliegt, der zwischen dem Tragschlepper (818) und der leistungsstärkeren Kombimaschine (1019) nicht existiert (Tabelle 66).

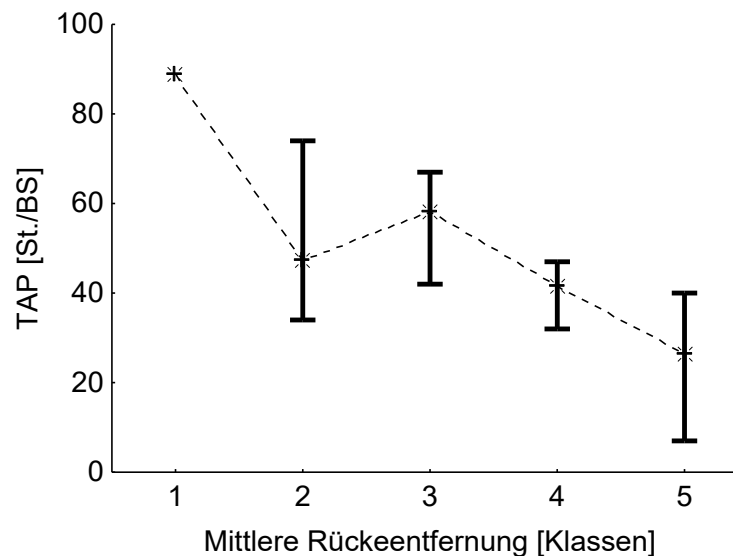


Abbildung 40: Produktivität beim Rücken von Bündeln in Abhängigkeit der Rückeentfernung. Minimal-, Maximal- und Mittelwerte der tageweisen Leistungsaufschriebe (N =46).

Die Schätzung der Rückeentfernung gestaltet sich fehleranfällig, da schnell subjektive Fehleinschätzungen folgen können. Die gemachten Angaben stammen jedoch durchweg von erfahrenen Maschinenführern, deshalb werden die Ergebnisse als verlässlich eingestuft und sollen kurz behandelt werden. Wie Abbildung 40 zeigt, bestehen erhebliche Differenzen hinsichtlich der Rückeleistungen bei unterschiedlichen zurückzulegenden Entfernungen. Mit Ausnahme der Klasse zwei, kann man festhalten, dass die Rückeleistung nahezu linear zur Rückeentfernung abnimmt. Es besteht ein signifikant negativer linearer Zusammenhang zwischen der Produktivität beim Rücken der Bündel und der Rückeentfernung ($r = -0,807$; $p = 0,01$; Signifikanzniveau $\alpha = 0,05$), wobei 65 Prozent der Varianz erklärt werden.

Bei der Berechnung der Produktivität beim Rücken von Bündeln im Rahmen des Bereitstellungskettenvergleichs wird mit einem Pauschalwert in Höhe von 40 Stück je MAS gemäß den Ergebnissen aus der v. g. Auswertung der Leistungsaufschriebe kalkuliert. Eine Reduzierung der Leistung mit zunehmender Rückeentfernung und Geländeneigung vollzieht sich analog zur Vorgehensweise bei der Rückung von Schlagabraum (s. Tabelle 46; Kapitel 5.2.1). Der kalkulierte Stundensatz für einen Forwarder (achtrad, 143 KW, 13 t Ladekapazität) beläuft sich auf 89 Euro je MAS (s. Tabelle 1.1-4 im Anhang).

5.3.4 Teilprozess Ferntransport von Bündeln durch Kurzholz-Lkw

Der Bündeltransport erfolgt von den Polterplätzen im Wald zu einer zentralen Entladestelle. Es ist davon auszugehen, dass sich die wesentlichen Arbeitsabläufe beim Transport der Bündel, wie etwa die Fahrten mit dem Lkw inner- und außerhalb des Waldes, nicht erheblich von den Vorgängen beim Transport von Kurzholz unterscheiden. Dieses betrifft vor allem

einerseits die Transportgeschwindigkeit, andererseits aber auch das allgemeine Handling der Fahrzeuge. Differenzen ergeben sich eventuell bei der Beladung, die sich in die Arbeitsschritte Ladevorbereitung, Beladevorgang und Ladungssicherung unterteilen lässt. Weiterhin ist anzunehmen, dass sich der Zeitbedarf für die Vorbereitung auf den Beladevorgang zwischen Kurzholz- und Bündeltransport nicht unterscheidet. Eine Divergenz ist demnach beim eigentlichen Beladevorgang und der Ladungssicherung selbst zu erwarten, Gleiches gilt für den Einsatz der diversen Lkw- und Kransysteme.

Insgesamt können im Rahmen der hier vorliegenden Untersuchung 42 Touren herangezogen und beleuchtet werden. Hierbei wurden insgesamt 2237 Kilometer zurückgelegt und 2105 Bündel transportiert, was einer durchschnittlichen Beförderung von circa 50 Bündeln pro Tour gleichkommt. Auf Basis der Untersuchungen in dieser Arbeit ist davon auszugehen, dass bei Auswahl der günstigsten und zulässigen Transportvariante eine maximale Zuladung von circa 50 Bündeln pro Fahrt erreicht wird. Die geringe Streuung der Lademenge ($s = 2,85$ Bündel) innerhalb der begleiteten Fahrten unterstützt diese These. Allerdings bleibt hinzuzufügen, dass die Größe der Bündel variabel ist, so dass sich durch geschickte Anpassung der Grad der Volumenauslastung verbessert. Des Weiteren ist zu konstatieren, dass die Untersuchungen allesamt mit Bündeln des Bündelaggregats Pinox 330 durchgeführt wurden. Wie unterschiedliche Autoren zeigen (u. a. NEFF, 2007; KÄRHÄ ET AL. 2004), weichen die Ausmaße der Bündel je nach verwendetem Bündelaggregat voneinander ab.

Tabelle 67: Ergebnis der Zeitstudie beim Bündeltransport mit unterschiedlichen Modellen an Kurzholz-Lkw. Angegeben sind die Mittelwerte der Ladezeit, der geladenen Bündel und der einfachen Transportentfernung (dT).

	Anzahl Touren [N]	Anzahl Wiegen [N]	Anzahl Sammelt. [N]	\bar{x} Ladezeit [Minuten]	\bar{x} Bündel [Stück]	\bar{x} dT [km]
K1	3	3	0	34	44	26
K2	8	1	0	35	52	27,5
K3	20	20	(8)	30 (35)	51	30
K4	11	1	0	32	49	20

Anhand der durchgeführten Zeitstudie lässt sich der Zeitbedarf der einzelnen Ablaufabschnitte eruieren. Mit durchschnittlich 32 Minuten pro Beladevorgang im Rahmen der Ganztouren liegt offensichtlich eine Zeiteinsparung gegenüber der Beladung mit Rundholz vor. BROCKMEIER (2013A) hat im Rahmen einer Arbeitszeitstudie in 31 Fällen unter anderem die Beladung von Kurzholzzügen näher betrachtet. Insgesamt nimmt die Beladung im Wald nach seiner Arbeitszeitstudie im Durchschnitt 36 Minuten in Anspruch. Dabei konnte er zeigen, dass der durchschnittlich Zeitverbrauch für die Ladungsvorbereitung etwa fünf (1,8 min), für den Beladevorgang selbst 66 (23,8 min) und für die Ladungssicherung 29 Prozent (10,4 min) der Gesamtzeit für die Beladung ausmachen. Wenn man davon ausgeht, dass, wie oben gesetzt, der Zeitverbrauch für die Ladungsvorbereitung beim Bündel- und Kurzholztransport

identisch ist und für die Ladungssicherung ebenfalls mindestens der gleiche Zeitkorridor benötigt wird, dann ist mit etwa 20 Minuten für den Beladevorgang pro Fuhre zu kalkulieren.

Vielfach diskutiert wurde die Ladungssicherung beim Transport der Bündel in Rungen-Lkw. Die Versuche haben die grundsätzliche Eignung der Rundholz-Lkw gezeigt, wobei lediglich bei einigen Touren ein Netz zur Sicherung der Ladung Verwendung fand. Die Einschätzung über die Notwendigkeit von Netzen im Sinne der Straßenverkehrsordnung (StVO, 2013) obliegt dem Fahrer. Da einige Touren mit dem Pkw begleitet wurden, ist festzustellen, dass die Maschinenführer im Sinne der Verkehrssicherheit nicht immer richtig mit ihrer Entscheidung lagen. Durch die Tatsache bedingt, dass sich in einem Bündel immer auch kurze Aststücke befinden, die nicht ausreichend durch die Schnüre fixiert sind, sollte die Empfehlung ausgesprochen werden, dass grundsätzlich Netze beim Transport zu gebrauchen sind. Insbesondere der Kurzholz-Lkw mit Schemelaufbau (K1) hatte derartige Schwierigkeiten beim Transport durch herabfallende Holzstücke, so dass die Beförderung auf Wunsch des Fahrers abgebrochen werden musste. Die offene Bauweise beim Schemelaufbau sorgt dafür, dass sich Holzteile lösen und auf die Straße gelangen können. Hinsichtlich der Ladungssicherung besser geeignet erscheinen Fahrzeuge mit Plattformaufbau und geschlossenen Stirnwänden an Zugfahrzeug und Anhänger. In diesem Fall sind zumindest die vorderen Bündel besser gegen den Fahrtwind geschützt, eine optimale Lösung stellt diese Variante allerdings nicht dar. Insgesamt wären Fahrzeuge mit angebauten Seitenwänden vorzuziehen. Hierzu gibt es individuell angefertigte Varianten aus Stahl und/oder Holz, die an den Rungen befestigt werden. Zudem existieren Lkw mit Spezialaufbauten, die auch den Transport von losem Astmaterial erlauben (s. Abbildung 21). Von den im Rahmen der Studie eingesetzten Fahrzeugen ist infolgedessen die Variante K4 in puncto Transportsicherheit zu bevorzugen. Durch die circa 100 Zentimeter hohen Seitenwände ist bereits eine deutliche Reduzierung der Gefahr herabfallender Holzstücke gegeben.



Abbildung 41: Entladung der Bündel durch den Ladekran der Kurzholz-Lkw.

Die Entladung beim Abnehmer findet durch den fahrzeugeigenen Kran oder durch werkseitige Vorrichtungen wie Portalkräne, Stacker und Lademaschinen statt (BORCHERDING, 2007). Im vorliegenden Fall erfolgte diese durch benannten Ladekran (s. Abbildung 41) und betrug im Durchschnitt 22 Minuten pro Vorgang. FISCHER (2001) dokumentierte in seiner Forschung vergleichbare Werte beim Entladen von zwei Meter langem Holz, FRIEDL ET AL. (2004) stellten

keinen signifikanten Unterschied beim Zeitaufwand zwischen Fremd- und Eigenentladung fest.

5.3.5 Teilprozess Ferntransport von Bündeln – Zeitverbrauch und Kosten

Aufgrund der größeren Flexibilität eines Kurzholz Lkws mit fahrzeugeigenem Ladekran, der besseren Eignung für Fahrten auf Waldwegen sowie der größeren Verbreitung im Forstein-satz und damit auch eines wirtschaftlicheren Einsatzes beim Bündeltransport gegenüber einem Container-Lkw wird für den Bereitstellungskettenvergleich auf eine optionale Berücksichtigung von Containerfahrzeugen zum Bündeltransport verzichtet. Wie bereits in Kapitel 5.2.5 erläutert, kann angenommen werden, dass sich der Rungen-Lkw hinsichtlich der Fahrzeit bei gleicher Entfernung und identischen Rahmenbedingungen nicht wesentlich von einem Container Lkw unterscheidet. Aus diesem Grund können die Gleichungen (7) und (9) zur Fahrzeitermittlung analog zum Container-Lkw übernommen werden. Voraussetzung für die Verwendung dieser Formel ist die Annahme, dass die mittlere Geschwindigkeit eines Lkws mit Abrollcontainer unter gleichen Bedingungen nicht von derjenigen eines Rundholz-Lkws differiert. Unterschiede ergeben sich hingegen beim Be- und Entladen des Rungenfahrzeugs mit dem bordeigenen Kran. Die Gesamtzeit für die Fahrzeugbeladung setzt sich zusammen aus dem eigentlichen Ladevorgang mit dem Kran bei laufendem Motor und der Ladungssicherung. Da es bei dem Kurzholzzug nicht zu systembedingten Wartezeiten kommt, ist der Zeitverbrauch für den Ladevorgang lediglich abhängig von der Anzahl der geladenen Bündel (vgl. Kapitel 5.3.4). Für die Ladungsvorbereitung und -sicherung wird unabhängig von der Anzahl der Bündel mit einem Pauschalwert von 12 Minuten kalkuliert. Für das Entfernen der Ladungssicherung und die Reinigung der Ladefläche nach dem Entladen wird mit einem Pauschalwert von 10 Minuten gerechnet (vgl. BROCKMEIER, 2013A / Kapitel 5.3.4; s. Tabelle 68).

Da bei der Modellanwendung unterstellt wird, dass die Bündel an der Entladestelle direkt durch den bordeigenen Kran des Lkws auf den Aufnahmetisch des stationären Zerkleinerers verbracht werden, ist der durchschnittliche Zeitverbrauch für das Abladen der Bündel ($Z_{Entl} (KHZ)$) je Tour neben der Anzahl geladener Bündel auch von der Leistung des stationären Zerkleinerers abhängig. Der Zeitverbrauch für das Entladen des Kurzholzzuges ergibt sich demnach aus Formel (19):

$$Z_{Entl} (KHZ) = \frac{V(Holz)}{1,2} \cdot \frac{1}{N_{Tour} (KHZ)} \cdot \frac{1}{L(Z)} \quad (19)$$

Es gilt:

$V (Holz)$	=	Gesamtholzvolumen der Erntemaßnahme [SRm]
$N (Tour)$	=	Anzahl notwendiger Touren, um das Holz abzutransportieren
$L (Z)$	=	Durchschn. Produktivität stationäre Zerkleinerung [St./MAS].

Der im Rahmen der Zeitstudie ermittelte Zeitverbrauch für das ungestörte Abladen der Bündel ist in der Regel geringer als die Aufnahmekapazität des Zerkleinerers im selben Zeitrahmen.

Daher erweist sich die Zerkleinerungsgeschwindigkeit als der bestimmende Faktor für den Zeitverbrauch des Abladens.

Tabelle 68 fasst den Zeitverbrauch bei der Be- und Entladung zusammen. Neben dem Entladevorgang, dessen Zeitverbrauch über die Formel (19) hergeleitet wird, stammen die übrigen Angaben aus den Zeitstudien (vgl. Kapitel 5.3.4) zum Lkw-Transport von Bündeln.

Tabelle 68: Kostenkalkulation Kurzholzzug: Be- und Entladung.

D_k	Leistungsdaten Be-/ Entladung	Kurzholzzug
27.	Zeitverbrauch Ladevorgang	0,4 min/St.
28.	Zeitverbrauch Entladevorgang	Formel (19)
29.	Zeitverbrauch Ladestelle ges.	D _k 27+12 min
30.	Zeitverbrauch Entladestelle ges.	D _k 28+10 min

Das Model nimmt darüber hinaus an, dass keine Zeiten für das Warten und Manipulieren der Fahrzeuge beim Bündeltransport mit Kurzholzzügen anfallen, weil der Transport unabhängig von anderen Maschinen erfolgt. In der Praxis zeigt sich diese Annahme als nicht vollständig zutreffend, da einige Polterplätze schwer zugänglich sein können und ohne Rückwärtsfahrt nicht zu erreichen sind. Unter diesen Umständen findet die Formel (7) vom Containertransport ebenfalls zur Berechnung des Gesamtzeitbedarfs beim Bündeltransport Anwendung. Dennoch ist der Zeitaufwand beim Hacken auf der Forststraße für den Lkw-Transport der Hackschnitzel bei gleichen Straßenbedingungen in der Regel größer, da der Hacker die Durchfahrt versperren kann und die Container des Gliederzuges vom Anhänger auf das Zugfahrzeug umgeladen werden müssen. Daher sind in der Gleichung die Werte für das Warten und Manipulieren mit „null“ anzusetzen.

Tabelle 69: Kostenkalkulation Kurzholzzug: Ergebnis Fixkosten.

F_k	Fixkosten	Kurzholzzug
36.	Kalk. Abschreibung $(A_{k1}-A_{k3}-A_{k6}) / A_{k2} * 0,5$	13.657 €/a
37.	Kalkulatorische Zinsen $((A_{k1}+A_{k3})/2+B_{k12}) * B_{k13}$	7.920 €/a
38.	Kfz-Steuer KraftStG, 2012	1.534 €/a
39.	Versicherungen Bodelschwingh, 2005	7.200 €/a
40.	Kommunikation Bodelschwingh, 2005	600 €/a
41.	Personal $(C_{k22}+C_{k23}+C_{k24}) * C_{k26}$	58.560 €/a
42.	Rep., Wartung (40 %) $B_{k14} * (A_{k1}-A_{k3}) / A_{k2} * 0,4$	6.864 €/a
43.	Verwaltungskosten GVE, 2013	15.000 €/a
44.	Fixkosten gesamt	Σ 111.335 €/a
45.	F_{k44}/B_{k10}	45,74 €/BS

Die Kostenkalkulation für den Kurzholzzug erfolgt entsprechend der Vorgehensweise beim Abrollkipper (vgl. Kapitel 5.2.8). Der Unterschied bei den kalkulierten Fixkosten innerhalb der beiden Transportoptionen liegt in den indifferenten Beschaffungspreisen, die wiederum Einfluss auf die kalkulierten Abschreibungen, Zinsen sowie Reparatur- und Wartungskosten

üben (BROCKMEIER, 2013A; KÜHMAIER ET AL., 2007; BODELSCHWINGH; 2005). Tabelle 69 liefert einen Überblick über die jährlich anfallenden feststehenden Ausgaben für die betrachtete Transportalternative.

Der Dieserverbrauch ist durch den Allradantrieb (6 x 4) und die größere Eigenmasse geringfügig höher; Reifenkosten fallen hingegen minimal geringer als beim Abrollkipper aus, da in diesem Beispiel auf der dritten Achse der Zugmaschine anstelle von Zwillingsbereifung spezielle Breitreifen verwendet werden, die in der Anschaffung günstiger sind als ein Paar Zwillingsreifen. Die Mautkosten gleichen sich infolge derselben Anzahl an Achsen und der maximal zulässigen Gesamtmasse von 40 Tonnen (Tabelle 60 und Tabelle 70).

Tabelle 70: Kostenkalkulation Kurzholzzug: Ergebnis Variable Kosten.

G_k Variable Kosten Kurzholzzug		Ø Tour	Individuell
46. Kalk. Abschreibung	$(A_{k1}-A_{k3}-A_{k6}) / A_{k2} * 0,5$	0,11 €/km	10,86 €/Tour
47. Rep., Wartung (60 %)	$B_{k14} * (A_{k1}-A_{k3}) / A_{k2} * 0,6$	0,10 €/km	10,30 €/Tour
48. Betriebsstoffe	$E_{k33} * B_{k16} * (1+B_{k15})$	0,48 €/km	52,42 €/Tour
49. Maut	$B_{k17} * E_{k32}$	0,20 €/km	4,58 €/Tour
50. Reifen	$A_{k6}/A_{k5}/*A_{k4}$	0,03 €/km	2,67 €/Tour
51. Variable Kosten gesamt	Σ	0,79 €/km	73,61 €/Tour

Es wird eine Nutzlast des Kurzholzgliederzuges von 21 Tonnen und ein maximales Ladevolumen ($V_{max}(KHZ)$) von 50 Bündeln pro Fahrt in der Modellrechnung angenommen. Die Masse der Bündel ist abhängig von der Baumart und wird durch Auswahl der Kategorie Nadel- oder Laubholz in der Eingabemaske und den in Kapitel 4.1 ermittelten Masseangaben bestimmt. Durch die entkoppelte Bereitstellungskette beim Bündlereinsatz ist davon auszugehen, dass grundsätzlich der Vorteil einer natürlichen Materialtrocknung am Waldweg ausgenutzt wird; die Notwendigkeit einer logistisch begründeten vorzeitigen Materialabfuhr, beispielsweise zur besseren Maschinenauslastung, besteht in der Regel nicht. Durch diese Tatsachen bedingt, wird unterstellt, dass die Bündelmasse 400 Kilogramm je Stück auch bei Laubholz nicht überschreitet, womit die Mitnahme von 50 Bündeln je Fuhre unter Berücksichtigung der Nutzlast jederzeit gewährleistet ist. Die Anzahl der notwendigen Touren ($N_{Tour}(KHZ)$) zum Abtransport der Bündel ergibt sich in diesem Zusammenhang aus Formel (20):

$$N_{Tour}(KHZ) = \lceil \cdot \rceil \frac{V(Holz)}{1,2} \cdot \frac{1}{V_{max}(KHZ)} \quad (20)$$

Das Gesamtholzvolumen der Maßnahme wird dabei mit dem Faktor 0,83 multipliziert (dividiert durch 1,2), um das Holzvolumen in die Anzahl an Bündeln zu transformieren. Der Faktor ergibt sich aus den Untersuchungen bei der Holzzerkleinerung und wird wie die übrigen Umrechnungsfaktoren im Kapitel 4.4 auf- und ausgeführt.

5.3.6 Teilprozess zentrale Holzaufbereitung – Stationäre Zerkleinerung

In der Holzindustrie werden seit jeher durch eine zentrale Holzaufbereitung das anfallende Rundholz, die Schwarten und Spreißel zerkleinert. Fest installierte Anlagen mit hohem Automatisierungsgrad sorgen für eine kontinuierliche Produktion. Die zum Einsatz kommenden Transport- und Zerkleinerungsaggregate werden durch Elektromotoren direkt oder indirekt angetrieben.

Bedingt durch die geringe Massendichte von losem Schlagabraum und die geschilderten, damit verbundenen wirtschaftlichen Probleme beim Transport über längere Strecken, spielt die zentrale Aufbereitung beim Waldrestholz bisher eine untergeordnete Rolle. Durch die Zerkleinerung im Wald mit mobilen Maschinen wird die Massendichte erhöht und eine gesteigerte Nutzlast bei der Beförderung erzielt - mögliche Nachteile werden dabei in Kauf genommen. Der Prozess der Zerkleinerung gestaltet sich dabei in der Regel kostenintensiver als vermutet, da die eingesetzten Zerkleinerer aufgrund ihrer mobilen Einsatzmöglichkeiten hohe Investitionskosten auslösen und die Abstimmung zwischen Hackerleistung und Transportkapazität einen großen Organisationsaufwand erfordert.

In einigen Studien wurde bereits der Einsatz von Großhackern an zentralen Plätzen, sogenannten Terminals, getestet (CREMER, 2008; SCHULER ET AL., 2007; HOCHRAINER ET AL., 2006; KANZIAN ET AL., 2006A). Durch die Vorkonzentration des Schlagabraums soll die Auslastung des Hackers verbessert werden, wobei allerdings ebenfalls mobile Zerkleinerungsmaschinen eingesetzt werden. Das Forschungsdesiderat hinsichtlich des Einsatzes stationärer Zerkleinerungsaggregate soll mit einem Feldversuch geschlossen werden. Zu diesem Zweck werden verschiedene Systeme untersucht.

Bei den Feldversuchen werden die zu zerkleinernden Waldrestholzbündel unter Verwendung eines Mobilbaggers mit Greifer in den Aufnahmetrichter der Zerkleinerer gefüllt. Nach Beendigung des ersten Ablaufabschnittes, dem Zerkleinern der Holzbündel und Befüllen eines Containers entsteht eine Arbeitsunterbrechung, während derer ein leerer Container gegen einen vollen ausgetauscht wird und der Mobilbagger gegebenenfalls die benötigte Menge an Bündeln für den nächsten Durchlauf vorkonzentriert. Der Standort der Zerkleinerer wird während der gesamten Versuchsreihe nicht verändert. Die Vorkonzentration zeigte sich als notwendig, da das Versuchsgelände keine ausreichende Lagerung in unmittelbarer Nähe zum Zerkleinerer erlaubt. Eine Unterteilung dieses zweiten Ablaufabschnittes erfolgt nicht. Es wird davon ausgegangen, dass bei einer stationären Verwendung dieser Maschinen eine erforderliche automatische Materiallieferung existiert und somit eventuell auf den Einsatz eines Laders, aber auf jeden Fall auf den Wechsel der Container verzichtet werden kann. Lediglich wenn aufgrund eines technischen oder wie auch immer gearteten Ausfalls der Zerkleinerer pausieren muss, soll separat gemessen werden. Beim Crambo 5000 wurde zu Beginn der Arbeiten ein Siebkorbwechsel durchgeführt, den das ungeübte Personal in circa 10 Minuten vornahm.

Beim Betrieb des Trommelhackers hingegen kam es zu einigen Unterbrechungen: Am ersten Einsatztag geriet ein einige Zentimeter großes Stahlteil in den Materialeinzug, die darauf folgende Beeinträchtigung des Hackers war derart groß, dass der Einsatz abgebrochen und

der Hacker mit Werkstattmitteln repariert werden musste. Mehrere Messer waren aus der Trommel ausgerissen und der Aufhängerahmen verformt worden. Der finanzielle Schaden am Hacker stellte sich beträchtlich dar und wurde vom Eigentümer mit 20 Tausend Euro angegeben. Der Ausfall der Maschine betrug circa eine Woche. Am zweiten Testtag wurden nach etwa 191 Kubikmeter erzeugtem Hackgut, die vor Arbeitsbeginn eingebauten neuen Messer mit Hilfe eines batteriebetriebenen Winkelschleifers bearbeitet. Der in dieser Tätigkeit erfahrene Führer benötigte hierfür etwa 15 Minuten.

Die Ergebnisse der Zeitstudie fasst Tabelle 71 zusammen. Insgesamt erstrecken sich die Aufnahmen über 13 Betriebsstunden, wobei der Hacker den größten Anteil besitzt (6,8 BS). Die beiden Wellenzerkleinerer, der Vorbrecher 750D und der Crambo 5000, der in diesem Versuchsaufbau ohne Sternsieb betrieben wird, weisen mit 2,3 (Crambo) beziehungsweise 3,9 Betriebsstunden (VB 750D) einen deutlich geringeren Versuchsumfang auf. Die durchschnittliche Produktivität fällt dabei ganz unterschiedlich aus: So schaffte es der VB 750D in sichtbar kürzerer Zeit, ein größeres Volumen an Hackgut zu erzeugen als der Hacker 560Z und erreichte dabei eine durchschnittliche Leistung von 176 Schüttraummetern je Betriebsstunde. Infolgedessen übersteigt der Vorbrecher in seiner Effizienz die durchschnittliche Produktivität des Hackers um 100 Schüttraummeter je Stunde. Der Crambo erzielt bei deutlich größerer Zerkleinerungsintensität als der VB 750D (vgl. Kapitel 4.4) immer noch eine Leistung von 141 Schüttraummetern je Betriebsstunde. Der durchschnittliche Zeitverbrauch für die Zerkleinerung eines Bündels ist beim Crambo am geringsten (53 s/St.).

Tabelle 71: Zusammenfassung der Ergebnisse der Zeitstudien bei der zentralen Zerkleinerung.

Bezeichnung	Σ BS [h]	Σ Bündel [St.]	Σ Hackgut [m ³]	\bar{x} TAP [St./BS]	\bar{x} TAP [m ³ /BS]
Crambo 5000	2,3	246	323	113	141
VB 750D	3,9	376	691	96	176
HEM 560Z	6,8	463	508	69	75

Angetrieben wird der Hacker im Versuchsaufbau durch einen Fendt-Schlepper mit maximal 257 Kilowatt Leistung an der Zapfwelle. Der Dieserverbrauch für die beiden Einsatztage beträgt nach Angaben des Maschinenführers 460 Liter, wobei neben den Betriebsstunden des reinen Hackens noch weitere 222 Minuten für die An- und Abfahrt des Gespanns hinzuzugerechnet werden müssen. Setzt man den Dieserverbrauch für die Transportfahrten auf 15 Liter je Stunde (DLG, 2007), resultiert hieraus ein Verbrauch beim Hacken von etwa 60 Litern je Betriebsstunde (s. Tabelle 72).

Da die Wellenzerkleinerer im Kontext der Feldversuche nicht mit einem Elektroantrieb zur Verfügung stehen, können die Energieverbrauchswerte lediglich anhand des Kraftstoffbedarfs geschätzt werden. Der Crambo 5000 wird von einem 13-Liter-Sechszylinder-Reihenmotor Caterpillar C13 mit 328 Kilowatt Nennleistung angetrieben. Letztere repräsentiert die größte

Nutzleistung, die ein Motor im thermischen Beharrungszustand abgeben kann (BACH ET AL., 2004).

Tabelle 72: Spezifischer Kraftstoffverbrauch (g/kWh) und Kraftstoffverbrauch pro Zeiteinheit (L/BS) der Zerkleinerungsmaschinen.

Bezeichnung	g/kWh ³³	L/BS	L/St.	L/m ³
Crambo 5000	138	54	0,65	0,50
VB 750D	81	25	0,27	0,14
HEM 560	205	60	0,87	0,80

Der Gesamtdieselvebrauch des Crambos beträgt im Rahmen des Feldversuchs 404 Liter. Der Durchschnittsverbrauch von 54 Liter je Betriebsstunde legt nahe, dass der Motor in der Regel deutlich unter seiner Nennleistung betrieben wurde. Berechnet man den Dieselvebrauch (vgl. Formel 2.4-2 im Anhang), beträgt dieser bei voller Nennlast 74 Liter je Stunde und damit 37 Prozent mehr als der im Versuch gemessene Durchschnitt.³⁴

Der Hammel-Vorbrecher besitzt mit Abstand den niedrigsten durchschnittlichen Kraftstoffverbrauch im Versuchsaufbau (s. Tabelle 72). Jedoch muss auch berücksichtigt werden, dass die Zerkleinerungsqualität beziehungsweise der Grad der Fragmentierung geringer ist als bei anderen Maschinen (s. Kapitel 4.4). Der Vorbrecher erzeugt, seinen speziellen Werkzeugen zum Trotz, immer noch ein sehr grobes Hackgut.

Tabelle 73: Vergleich der Energiekosten eines Crambo 5000 bei Volllast und bei einem Elektro- oder Dieselantrieb.

	P_{mech} [kW]	η_n [%]	Energie	Preis je Einheit (netto)	Kosten je Stunde
Elektroantrieb	300	90	333 kWh	0,15 EUR/kWh	50,00 Eur/h
Dieselantrieb	328	45	74 L	1,18 EUR/L	86,62 Eur/h

Um die Vorteile einer stationären Zerkleinerung ausschöpfen zu können, setzt man Elektroantriebe ein. Diese Form der Kraftquelle ist wartungsärmer und verfügt über einen höheren Wirkungsgrad³⁵. Schätzt man die Unterschiede zwischen den beiden Antriebsarten ab, zeigt sich das folgende Ergebnis: Die benötigte mechanische Antriebsleistung des Crambo 5000 bei Elektroantrieb beträgt 300 Kilowatt. Hieraus kann die elektrische Leistungsaufnahme berechnet werden. Deutlich wird, dass bei Nennlastbetrieb (ca. 207 kW) entsprechend der überschlägigen Rechnung und nach derzeitigen Marktpreisen etwa 60 Prozent Energiekosten für den Antrieb des Crambo 5000 bei einem Elektroantrieb, gegenüber dem Dieselantrieb, eingespart werden können (vgl. Tabelle 73).

³³ Bei einer Dichte des Diesels von 0,839 kg/L.

³⁴ Bei einem angenommenen Wirkungsgrad des Motors von 45 %; geringfügige Abweichungen sind in der Praxis möglich.

³⁵ Wirkungsgrad der Stromerzeugung nicht eingerechnet.

5.3.7 Teilprozess zentrale Holzaufbereitung – Stationäre Sortimentierung / Siebung

Neben der Zerkleinerung soll in einem zweiten Schritt die stationäre Siebung untersucht werden. Dabei werden zunächst 377 Bündel mit dem Crambo 5000 zerkleinert und anschließend separiert das Sternsieb (Komptech Multistar M3) das zerkleinerte Material in drei Fraktionen. Die Körnung der drei Produkte wird durch die Rotationsgeschwindigkeit der Sterne bestimmt. Je nach Beschaffenheit des Ausgangsmaterials muss die Einstellung der Geschwindigkeit neu vorgenommen werden. Die Abbildung 42 (links) zeigt die auf Wellen befestigten Sterne im unteren Siebdeck, die der Abtrennung der Feinstanteile im Hackgut dienen. Da Sternsiebanlagen als unempfindlich hinsichtlich der Feuchtigkeit des Siebguts gelten, gewähren sie auch bei feuchtem Ausgangsmaterial eine ordnungsgemäße Absiebung.

Die Beschickung der Siebanlage erfolgt durch den Förderbandaustrag des Zerkleinerers (s. Abbildung 42, rechts). Nimmt man eine kontinuierliche Beschickung vor, kann ein optimaler Füllgrad garantiert werden; bei einer stoßweisen Befüllung, beispielsweise durch einen Lader, sorgt eine Dosierwalze für eine gleichmäßige Verteilung auf dem Siebdeck. Das fertige Gut wird am hinteren Ende der Siebanlage ausgetragen und durch drei separate Förderbänder, die um 90 Grad versetzt sind, jeweils links und rechts sowie nach hinten abtransportiert. Die Förderhöhe beläuft sich auf maximal 410 Zentimeter.



Abbildung 42: Detailaufnahme vom unteren Siebdeck (links) und der Materialaufgabe (rechts) bei einem Sternsieb.

Der Versuchsaufbau sieht drei Durchläufe vor, wobei die Volumina der einzelnen Fraktionen sowie die Arbeitszeiten bestimmt werden. Im Rahmen dieser Durchgänge werden insgesamt 117 Bündel zerkleinert und gesiebt, wozu die Siebanlage 1,6 Betriebsstunden benötigt (s. Tabelle 74). Bei den übrigen Durchläufen mit Siebanlage wird das Überkorn wieder dem Zerkleinerer zugeführt und nochmals fragmentiert. Auf diese Weise war es möglich 260 Bündel zu zerkleinern und zu konfektionieren. Das größte Hackgutvolumen entsteht bei der Siebung in der mittleren Korngröße (10-80 mm); etwa 60 Prozent der Gesamtmenge sind dieser Klasse zuzuordnen, während 12 Prozent an Fehlkorn und 28 Prozent an Grobgut anfallen. Eine genaue Materialanalyse der Siebfraktionen findet sich in Kapitel 4.4. Bei den begleiteten Einsätzen musste die Einstellung der Siebanlage im laufenden Betrieb nachjustiert werden, um ständig ein gutes Resultat zu erzielen. Zu Beginn der Versuchsreihe war die Korngröße im Unterkorn deutlich über dem gewünschten Maß von weniger als 10 Millimeter Kantenlänge, so dass man neben den mineralischen Anhaftungen auch viele kleine Holzstücke über die Feinkornaustragung absiebte.

Bei den übrigen Durchläufen mit Siebanlage wird das Überkorn wieder dem Zerkleinerer zugeführt und nochmals fragmentiert. Auf diese Weise war es möglich 260 Bündel zu zerkleinern und zu konfektionieren.

Tabelle 74: Das Volumen der unterschiedlichen Größenfraktionen nach der Siebung von Waldrestholz mit einem Sternsieb.

Bezeichnung	Σ BS [h]	Σ Bündel [St.]	Σ Unterkorn [m ³]	Σ Mittelkorn [m ³]	Σ Grobkorn [m ³]
Multistar M3	1,6	117	20	98	45
	3,6	260	55	314	-

Der Zeitverbrauch für die einzelnen Durchgänge und die Anzahl der aufgearbeiteten Bündel geben Aufschluss über die Arbeitsproduktivität: Es zeigt sich, dass sich die Produktivität mit oder ohne Nachzerkleinerung des Grobkorns annähernd gleich ausnimmt (s. Tabelle 75).

Tabelle 75: Ergebnisse der Zeitstudie zur Siebung von Waldrestholz mit einem Sternsieb.

Bezeichnung	Σ BS [h]	Σ Bündel [St.]	\bar{x} TAP [St./BS]	\bar{x} TAP [m ³ /BS]
Crambo 5000 mit Sieb	1,6	117	74	104
Crambo 5000 mit Sieb und 'Nachzerkleinerung'	3,6	260	71	101
Crambo 5000 ohne Multistar M3	2,3	246	113	141

Festzuhalten bleibt zudem, dass, verglichen mit der Leistung bei der Zerkleinerung ohne gleichzeitige Materialsiebung, die Verwendung einer Siebanlage die Effizienz beim Zerkleinern signifikant reduziert³⁶ (vgl. Tabelle 75). Nach Angaben des Herstellers resultiert der Leistungsrückgang aus einer geringeren maximalen Durchsatzleistung des Sternsiebes M3 als die des Crambo 5000. Infolgedessen war es nötig, um ein optimales Siebergebnis zu erzielen, die Leistung des Crambos manuell zu reduzieren. Von einer bestmöglichen Abstimmung der Maschinen aufeinander kann entsprechend nicht die Rede sein. Auf der anderen Seite kam es durch Rückführung des Grobkorns nicht zu einem signifikanten Leistungsabfall des Gerätes, was die maximale Durchsatzleistung des Crambos nochmals unterstreicht.

Grundsätzlich werden alle Komponenten der Komptech Sternsieberanlage elektrisch angetrieben, jedoch verfügt die mobile Variante, die beim Versuch zum Einsatz kommt, darüber hinaus über einen Dieselgenerator, der die notwendige elektrische Energie erzeugt. Der Dieselverbrauch des Generators betrug während des Versuchseinsatzes 48 Liter, was einem Durchschnittsverbrauch von 9,2 Liter je Betriebsstunde entspricht. Um wiederum den theore-

³⁶ Nachgewiesen durch einen t-Test bei Annahme unterschiedl. Varianzen; $p < 0,002$ (Signifikanzniveau: 5 %).

tischen Strombedarf zu kalkulieren, kann anhand des Dieserverbrauchs die elektrische Leistungsaufnahme berechnet werden (vgl. Kapitel 5.3.6). Diese beträgt 41 Kilowatt. Daher ergibt sich bei 5,2 Betriebsstunden ein Energieverbrauch von 214 Kilowattstunden. Auch hier erweist sich der Elektroantrieb aktuell als die deutlich günstigere Variante.

5.3.8 Teilprozess zentrale Holzaufbereitung – Zeitverbrauch und Kosten

Im Kontext des Bereitstellungskettenvergleichs zieht die Studie exemplarisch die Maschinen der Firma Komptech heran. Die aktuellen Listenpreise für den Zerkleinerer Crambo 5000 und das Sternsieb Multistar M3 finden sich in Kapitel 3.5.3 dieser Arbeit. Voraussetzung für die Verwendung stationärer Maschinen ist in der Regel ein ausreichend großer Materialumschlag an einem Standort, wie er bei einer industriellen Nutzung von Waldrestholz gegeben ist. Die Hersteller stationärer Zerkleinerungsanlagen rechnen infolgedessen nicht selten mit mehr als fünf Tausend Betriebsstunden pro Jahr, eine Zahl, die auch für die Kostenkalkulation in dieser Arbeit angesetzt wird. Unter wirtschaftlichen Gesichtspunkten wird entsprechend die normale Nutzungsdauer der Maschinen nach vier Jahren oder 22 Tausend Betriebsstunden erreicht.

Die stationären Maschinen sind fest in die Infrastruktur am Produktionsstandort integriert: Dies betrifft sowohl die Steuer- und Regelungstechnik als auch die Materialzu- und abführung. Da der Materialtransport auch bei der Anlieferung von zerkleinertem Holz für den Betrieb eines Kraftwerks oder einer Spanplattenproduktion notwendig ist, scheint es nicht obligatorisch, auf die Infrastruktur im Rahmen des Vergleichs der Bereitstellungsketten weiter einzugehen. Indem man die Zerkleinerungsanlagen in die Steuerung der Gesamtanlage einbindet, können die stationären Maschinen zentral überwacht werden. Ein Maschinenführer, wie er bei den mobilen Maschinen existiert, ist in diesen Fällen nicht mehr zwingend. Eine notwendige temporäre Sichtkontrolle oder auch das Eingreifen bei Störungen kann vom Personal des Holzladeplatzes übernommen werden. Entsprechend wird im Rahmen der Kostenkalkulation mit einer halben Personalstunde je voller Betriebsstunde kalkuliert.

Ein weiterer deutlicher Unterschied zwischen stationären und mobilen Maschinen besteht darin, dass Geräte, die fest am Produktionsstandort installiert sind, mit elektrischen Antrieben arbeiten, während mobile Maschinen auf Verbrennungsmotoren zur Energieerzeugung zurückgreifen. Durch die Verwendung elektrischer Antriebe können erhebliche Kosten bei Anschaffung und Betrieb eingespart werden (vgl. Kapitel 5.3.6).

Die Berechnung des kalkulierten Stundensatzes erfolgt mithilfe der Ingenieurformel auf gleiche Weise wie bei den mobilen Maschinen (vgl. Kapitel 3.5.3). Da für die kalkulierten Reparaturkosten kein geeigneter Koeffizient aus Erfahrungswerten vorliegt, wird anhand der Ersatzteillisten für alle dem Verschleiß unterliegenden Maschinenteile, eine Abschätzung vorgenommen. Durch Preis und Standzeit („*Service-Life*“) der jeweiligen Ersatzteile lassen sich die aufgelaufenen Reparaturkosten zu jeder beliebigen Nutzungsdauer der Maschine errechnen (s. Abbildung 43). Es zeigt sich, dass die Reparaturkosten über die Nutzungsdauer in Form einer Kurve verlaufen, die dem vertikalen Längsschnitt einer Badewanne ähnelt: zunächst hoch, dann gleichbleibend gering, zum Ende wieder steigend. Der Tiefpunkt der Kurve hat

einen x-Wert von 22 Tausend Betriebsstunden. Zu diesem Zeitpunkt sind die jährlichen Reparaturkosten am geringsten. Mit zunehmender Nutzungsdauer steigen diese wieder an.

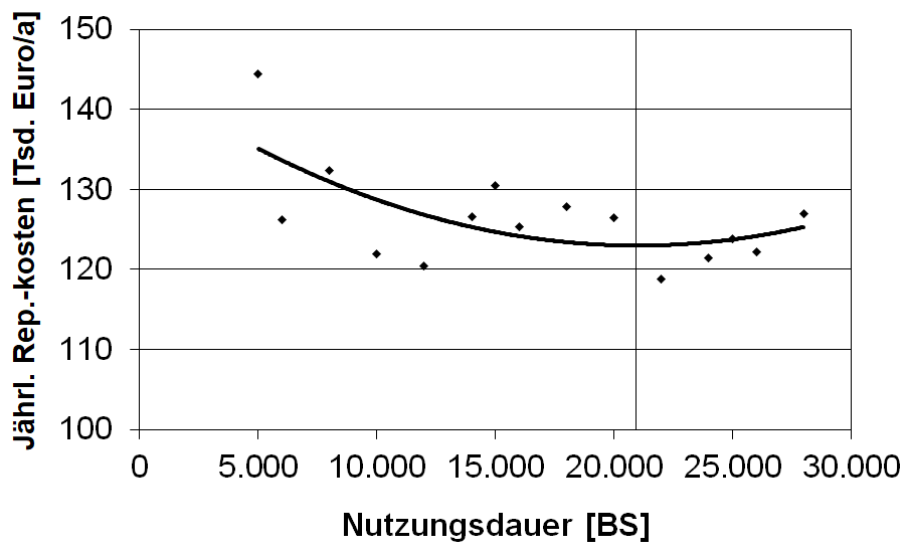


Abbildung 43: Jährliche Reparaturkosten der stationären Zerkleinerungsanlage am Beispiel des Crambo 5000 der Firma Komptech (Rauten) und polynomische Trendlinie ($R^2 = 0,4$) bei Annahme von 5.000 BS/a.

Bei der angedachten stationären Verwendung der Maschinen reduzieren sich die Reparaturkosten um die Aufwendungen zur Pflege und Instandhaltung des Dieselmotors (bspw. Motorenöl). Entsprechend beläuft sich der kalkulierte Stundensatz für die stationären Maschinen auf 72,48 für die Zerkleinerungsanlage und 45,72 Euro je MAS für die Siebanlage (s. Tabellen 2.4-26 u. 2.4-27 im Anhang).

Die Produktivität für den Crambo 5000 bei der stationären Zerkleinerung ($L(H)$) ergibt sich aus den Ergebnissen der Zeitstudien in Kapitel 5.3.6. Demnach wird eine Leistung von 113 Bündeln je MAS angenommen, die sich bei Verwendung einer nachgeschalteten Siebanlage auf 71 Bündel je MAS reduziert.

5.3.9 Übersicht Zerkleinerung am Werk

Die betrachtete Bereitstellungskette verfügt über einen hohen Grad der Mechanisierung. Das wesentliche Merkmal dabei ist die Zerkleinerung am Werk mit stationären Anlagen. Die nachfolgende Tabelle zeigt Ergebnisse und Rechenschritte der Teilprozesse. Damit ist es zwar grundsätzlich möglich Teilprozesse auszutauschen und mit anderen zu kombinieren (bspw. aus Kapitel 5.2), jedoch hat die vorangegangene, vergleichende Auswertung gezeigt, dass die vorgestellte Bereitstellungskette unter Verwendung des Bündlervorgangs als optimal anzusehen ist.

Wichtigste Ausgangsgröße für die Modellberechnung beim Bereitstellungskettenvergleich ist die durchschnittliche Leistung der einzelnen Teilprozesse, die teilweise durch speziell hergeleitete Modelle (vgl. Kapitel 5.3.1) ermittelt wird. Dabei ist ein wesentlicher Bestandteil auch

die Berücksichtigung von individuellen Transportentfernungen und -kapazitäten. Wartezeiten treten nicht auf, da es sich um eine entkoppelte Arbeitskette handelt.

Tabelle 76: Übersicht Modell Bereitstellungskettenvergleich – Zerkleinerung am Werk (B = Bündeln; R = Rücken; T = Ferntransport; Z = Zerkleinerung; S = Siebung).

Bereitstellungskette Zerkleinerung am Werk	
B	$k(B) = \frac{N(B)}{\text{Windwurf} \Rightarrow L = \text{Formel}(1) \quad \vee \quad \text{Normal} \Rightarrow L = 2 \cdot \text{Formel}(1)} \cdot \frac{\text{Forw.} \Rightarrow 115 \text{€} \vee \text{Kombi.} \Rightarrow 132 \text{€}}{MAS}$
R	$k(R_2) = \frac{N(B)}{L = 40 \text{ St./MAS} \cdot \text{Korrekturfaktor Ruckeentf. Tabelle 72}} \cdot \frac{89 \text{€}}{MAS}$
T	$k(Lkw_2) = \text{Formel}(19) \cdot (\text{Formel}(6) \cdot 45,74 \text{€} / MAS + d_T \cdot 2 \cdot 0,79 \text{€} / km)$
Z	$k(Z_2) = \frac{N(B)}{L = \text{ohne Sieb} \Rightarrow 113 \text{ St./MAS} \quad \vee \quad \text{mit Sieb} \Rightarrow 71 \text{ St./MAS}} \cdot \frac{72,48 \text{€}}{MAS}$
S	$k(S_2) = \frac{N(B)}{L = 71 \text{ St./MAS}} \cdot \frac{45,72 \text{€}}{MAS}$
Σ	$K_2 = k(B) + k(R_2) + k(Lkw_2) + k(Z_2) + k(S_2)$

Hier gilt: $N(B)$ = Anzahl Bündel der Erntemaßnahme [St.]
 L = Leistungskennwert der einzelnen Betriebsmittel
 k = Kalkulierte Kosten für den Betriebsmitteleinsatz [EUR/MAS]
 d_T = Einfache Transportentfernung [km]
 K_2 = Gesamtkosten Zerkleinerung am Werk

Die Leistung beim Bündeln wird erheblich davon beeinflusst, ob die Maßnahme auf einer vom Windwurf beeinträchtigten Fläche stattfindet. Die Kosten wiederum hängen auch davon ab, ob das Bündelaggregat auf einem Forwarder oder auf der teuren Kombimaschine installiert ist. Eine weitere Auswahlmöglichkeit bei der Anwendung des Modells existiert für die Verwendung eines Siebes im Anschluss an die stationäre Zerkleinerung.

6 Ergebnisse durch Anwendung des Vergleichs

Das Modell zum Vergleich der beiden Bereitstellungsketten soll dem Anwender helfen, möglicherweise auftretende Schwierigkeiten im Praxiseinsatz, auf der Basis von wenigen spezifischen Eingangsgrößen, zu erkennen. Dabei können die Werte, die zur Berechnung von Leistungsdaten und Kosten im Modell hinterlegt sind, auf die individuellen Gegebenheiten des Anwenders abgestimmt werden. Im Folgenden wird das entwickelte Modell zunächst getestet, indem es durch Eingabe von Parametern aus realen Praxiseinsätzen angewendet und das Resultat mit den Forschungsergebnissen verglichen wird. Darüber hinaus werden die Eingangsdaten aus einem fiktiven Einsatz ausgewertet, um grundsätzliche Stärken und Schwächen der Bereitstellungsketten und des Modells zu identifizieren.

6.1 Überprüfung des Modells durch Praxisbeispiele

Anhand dreier Beispiele soll die Praxistauglichkeit des Modells zur Durchführung des Bereitstellungskettenvergleichs überprüft werden. Die Exempel wurden dabei so ausgewählt, dass Untersuchungsergebnisse zu allen Fertigungsprozessen vorliegen, um eine Gesamtbeurteilung der Maßnahmen vornehmen zu können. Sie sind nicht Bestandteil anderer, im Rahmen dieser Arbeit verwendeter Untersuchungen. Um die Unterscheidung zu erleichtern, werden die Beispiele durchnummeriert und entsprechend benannt. Die Einteilung der Platzverhältnisse erfolgt nach subjektiver Einschätzung des Autors.

Tabelle 77: Bereitstellungskettenvergleich: Eingangsdaten der drei Praxisbeispiele.

A Eingangsdaten		Beispiel 1	Beispiel 2	Beispiel 3
1.	Menge	225 SRm	1.300 SRm	835 SRm
2. Restholz	Baumart	Laub	Nadel	Nadel
3.	Vortrocknung	Nein	Ja	Ja
4.	Rückeentfernung	300	200	400
5.	Geländeneigung	2	1	4
6. Bestand	Erntevorbereitung	1 (ja)	0 (nein)	1 (ja)
7.	Rundholzanfall	50 Efm/ha	400 Efm/ha	400 Efm/ha
8.	Zopfdurchmesser	10 cm	8 cm	15 cm
9. Restholz-	Trägerfahrzeug	Kombi	k. A.	Kombi
10. bündler	Einsatzgebiet	Normal	Windwurf	Normal
11. Mobilhacker	Betriebsstunden	k. A.	k. A.	k. A.
12. Hackgut-	Platzverhältnisse	Schlecht	Mittel	Mittel
13. transport	Anzahl Lkw	k. A.	2	k. A.
14.	Anhänger	k. A.	Ja	k. A.
15. dT		44 km	68 km	39 km
16. St. Zerklein.	Antriebsart	Elektro	k. A.	Diesel
17. Hackgut	Siebung	Ja	Ja	Ja

In Tabelle 77 sind die möglichen Eingangsdaten zur Durchführung des Vergleichs aufgelistet und mit den Daten der drei Beispiele ausgefüllt. Die Eingangsdaten beziehen sich auf die

naturrellen Bedingungen des zu kalkulierenden Einsatzes (Restholz- und Bestandesdaten) sowie auf Angaben zu den Maschinen und übrigen Einsatzbedingungen. Bei den drei Praxisbeispielen können zur Ermittlung der technischen Arbeitsproduktivität der einzelnen Arbeitsverfahren Leistungsaufschriebe der Maschinenführer herangezogen werden, die es erlauben, in allen Beispielfällen die Einsatzstunden der jeweiligen Betriebsmittel zu berücksichtigen. Die Restholzmenge wird durch die Zählung und Umrechnung der Bündel beziehungsweise die Abnahmeprotokolle bei der Hackgutanolieferung ermittelt.

6.1.1 Überprüfung des Modells am Beispiel 1: Buchenrestholz aus Durchforstung

Die Bereitstellung des Waldrestholzes nach Beispiel 1 erfolgt durch Restholzbündelung und zentrale Zerkleinerung am Spanplattenwerk: eine Vorgehensweise, die der Kette 2 im Rahmen des Vergleichs entspricht. Als Alternative kommen die Rückung von losem Schlagabraum und die anschließende Hackung des Materials am Waldweg in Betracht (Kette 1). Die in Tabelle 77 angegebenen Eingangsdaten dienen als Grundlage für die Ermittlung von Produktivität und Kosten der einzelnen Arbeitsverfahren, wobei das Ergebnis der Leistungsberechnung und der tatsächlich ermittelten Werte in Tabelle 78 aufgeführt wird. Deutlich wird anhand dieser Daten, dass das Modell die Leistung beim Bündeln erheblich überschätzt: Die Leistungsaufschriebe der Maschinenführer haben insgesamt 12,5 Betriebsstunden ausgewiesen, wodurch eine durchschnittliche Arbeitsleistung von 15 Bündeln je Betriebsstunde erreicht wird. Das Modell ermittelt hingegen einen Wert von 31,5 Bündeln je MAS - dieser Wert ist auch im Vergleich zu den Ergebnissen anderer Studien (vgl. Tabelle 2.1-9 im Anhang) als hoch anzusehen. Hierbei verstärkt die berechnete Verdoppelung der Leistung unter ‚normalen‘ Bedingungen den Eindruck, dass es sich um eine artikulierte Fehlkalkulation handelt. Anderenfalls ergibt sich ohne Verdoppelung und bei Beibehaltung der übrigen Parameter eine durch das Modell ermittelte Produktivität von 15,8 Bündeln je MAS. Dieser Wert liegt nahe an den in der Praxis ermittelten Daten auf dieser Fläche.

Die Produktivität beim Rücken der Bündel wird exakt durch das Modell berechnet: Der Leistungsaufschrieb erbrachte einen Zeitverbrauch von fünf Betriebsstunden für das Rückefahrzeug, was einer Leistung von circa 37 gerückten Bündeln je Betriebsstunde entspricht. Erwähnt seien an dieser Stelle noch einmal die möglicherweise auftauchenden Rundungsfehler, zudem konnte der Wert nicht anhand des Betriebsstundenzählers der Maschine kontrolliert werden.

Tabelle 78: Bereitstellungskettenvergleich: Leistungsdaten von Praxisbeispiel 1.

B1 Leistung	Kette 1	Kette 2	IST
18. Bündeln	----	31,5 St./MAS	15,0 St./BS
19. Rücken	16,7 SRm/MAS	33,5 St./MAS	37,4 St./BS
20. Lkw-Transport	9,3 SRm/MAS	15,6 St./MAS	19,5 St./BS
21. Zerkleinerung	50,0 SRm/MAS	71,0 St./MAS	74,8 St./BS
22. Siebung	85,2 SRm/MAS	71,0 St./MAS	k. A.

Um einen vollständigen Abtransport der Bündel durch einen Kurzholz-Lkw durchzuführen, wird mit Hilfe des Modells eine Anzahl von vier Touren berechnet, was der tatsächlichen Fahrtenmenge entspricht. Die Leistung, die vom Modell angegeben wird, liegt unterhalb der tatsächlichen Durchschnittsleistung beim Lkw-Transport: Demnach hat der Lkw insgesamt 9,5 Stunden (ohne Pausen) an zwei Werktagen für den Transport von 187 Bündeln benötigt, was 19,5 Bündeln pro Betriebsstunde gleichkommt.

Die Weiterverarbeitung der Holzmengen erfolgte direkt am Spanplattenwerk. Für die Zerkleinerung in der stationären Anlage mussten 2,5 Stunden aufgebracht werden. Ein Mobilbagger hat die Bündel der Anlage zugeführt, so dass Leerlaufzeiten beim Zerkleinerer entstanden sind.

Die kalkulierten Kosten für beide Verfahren sind der Tabelle 79 zu entnehmen: Es zeigt sich hier im Vergleich der beiden Bereitstellungsketten ein deutlicher Unterschied, der aufgrund der geringeren Kosten zugunsten des Bündelverfahrens (Kette 2) ausfällt. Die angesprochene Überschätzung der Bündelleistung führt zu entsprechend niedrigen Ausgaben für diesen Teilbereich in Kette 2. Nimmt man eine tatsächliche Leistung von 15 Bündeln je MAS an, ergeben sich Gesamtkosten von 3244 Euro, die damit immer noch um circa 48 Prozent unterhalb der kalkulierten Ausgaben für Bereitstellungskette 1 liegen.

Tabelle 79: Bereitstellungskettenvergleich: Kosten der einzelnen Arbeitsverfahren und Gesamtkosten für Beispiel 1.

C1 Kosten	Kette 1		Kette 2	
23. Bündeln	----	----	787 €	3,50 €/SRm
24. Rücken	1.197 €	5,32 €/SRm	499 €	2,22 €/SRm
25. Lkw-Transport	1.145 €	6,42 €/SRm	849 €	3,77 €/SRm
26. Zerkleinerung	864 €	3,84 €/SRm	191 €	0,85 €/SRm
27. Siebung	261 €	1,16 €/SRm	121 €	0,54 €/SRm
28. Gesamt	3.767 €	16,74 €/SRm	2.447 €	10,88 €/SRm

Im betrachteten Fall lohnt es sich bereits ab einer einfachen Transportentfernung von 5 Kilometern vier Lkw gleichzeitig einzusetzen. Wie die Modellberechnungen zeigen, lassen sich jedoch, bei der angegebenen Entfernung von 44 Kilometern, durch den Einsatz von fünf Lkw die niedrigsten Kosten für die Kette 1 erzielen (s. Tabelle 79). Bei der angegebenen Holzmenge von 225 SRm scheint der gleichzeitige Einsatz von fünf Lkw dagegen nicht praxisrelevant zu sein. Wird auf Basis des Praxiseinsatzes vorausgesetzt, dass für den Transport des zerkleinerten Holzes zwei Abrollkipperzüge benötigt werden, was durchaus realistisch erscheint, dann erhöhen sich die kalkulierten Kosten auf 6226 Euro. Die Wartezeit des Hackers beträgt in diesem Fall über 7,5 Stunden, weshalb die großen Kostenunterschiede erklärt werden können.

6.1.2 Überprüfung des Modells am Beispiel 2: Fichtenrestholz nach Windwurf

Beispiel 2 zeigt die Ergebnisse der Leistungsdaten bei der Rückung von Schlagabraum von einer Fichtenwindwurffläche und der anschließenden mobilen Zerkleinerung des Restholzes.

Für das Rücken mussten in diesem Fall 54 Betriebsstunden laut Leistungsaufschrieb aufgewendet werden, woraus sich bei einer Gesamtmenge von 1300 Schüttraummeter eine durchschnittliche Leistung von 24,1 Schüttraummeter je Betriebsstunde ergibt (s. IST-Wert in Tabelle 80). Die vom Modell berechnete Effizienz beim Rücken findet sich unterhalb des tatsächlichen Wertes, ebenso die Leistung beim Transport, welche im Modell mit 12,7 Schüttraummeter je Betriebsstunde geringfügig unterschätzt wird.

Der Modellwert hinsichtlich der Hackerleistung differiert gegenüber der Praxis nur um etwa fünf Prozent. Die Zeiten für das Warten und die übrigen unproduktiven Tätigkeiten fallen im Gegensatz dazu unterschiedlich lang aus und sind durch die Leistungsangabe je Betriebsstunde nicht ersichtlich. So können unter Umständen lange Wartezeiten entstehen, wenn aufgrund der großen Transportentfernung – im Praxisbeispiel wurde das gehackte Holz in ein 68 Kilometer entferntes Holzheizkraftwerk transportiert – unkalkulierte Unterbrechungen bei der Beförderung auftreten.

Da häufig für den Einsatz in der Industrie maximal 25 Prozent Feinanteile (<10 mm) im Hackgut erlaubt sind, ist nicht auszuschließen, dass das zerkleinerte Holz vor der Verwendung noch durch Sieben weiter aufbereitet werden muss. Angaben hierzu finden sich bei den Leistungsaufschrieben jedoch nicht, so dass lediglich im Modell die Kosten für diesen Vorgang einkalkuliert werden.

Tabelle 80: Bereitstellungskettenvergleich: Leistungsdaten von Praxisbeispiel 2.

B2 Leistung	Kette 1	IST	Kette 2
18. Bündeln	---	---	8,8 St./MAS
19. Rücken	19,4 SRm/MAS	24,1 SRm/BS	38,8 St./MAS
20. Lkw-Transport	13,4 SRm/MAS	16,3 SRm/BS	13,0 St./MAS
21. Zerkleinerung	50,0 SRm/MAS	53,1 SRm/BS	71,0 St./MAS
22. Siebung	85,2 SRm/MAS	k. A.	71,0 St./MAS

Bei der Betrachtung der kalkulierten Kosten (vgl. Tabelle 81) springt zunächst der deutlich höhere Gesamtbetrag im Vergleich zum Beispiel 1 ins Auge. Dieser resultiert aus der Tatsache, dass im Beispiel 2 deutlich mehr Restholz bereitgestellt und aufgearbeitet werden muss. Aber auch bei den Durchschnittskosten zeichnet sich ein Unterschied ab: Hier ergeben sich bei der günstigeren Alternative (Kette 1) im Beispiel 2 Durchschnittskosten von 18,00 Euro je Schüttraummeter, diese sind etwa 40 Prozent höher als bei der günstigeren Bereitstellungskette im Beispiel 1. Begründet liegt diese Differenz teilweise in der längeren Transportentfernung im Beispiel 2.

Insbesondere die hohen kalkulierten Kosten für das Bündeln machen die Kette 2 aus wirtschaftlicher Sicht unattraktiv, da das Modell eine, aus der schlechten Arbeitsorganisation herrührende, geringe Leistung beim Bündeln unterstellt. Nach Aufarbeitung des Stammholzes wurden die Baumkronen und Äste nicht für eine weitere Nutzung dieses Materials vorgesehen, weshalb keine Vorkonzentration erfolgte, sondern sich das Holz auf die Fläche beziehungsweise die Rückegasse verteilte und teilweise überfahren wurde. Diese Situation wirkt

sich gravierend auf die Leistung beim Bündeln aus, so dass die Produktivität derartig schlecht wird, dass das Restholz nicht mehr wirtschaftlich durch Bündler bereitgestellt werden kann.

Tabelle 81: Bereitstellungskettenvergleich: Kosten der einzelnen Arbeitsverfahren und Gesamtkosten für Beispiel 2.

C2 Kosten	Kette 1		Kette 2	
23. Bündeln	----	----	16.344 €	12,57 €/SRm
24. Rücken	5.847 €	4,50 €/SRm	2.436 €	1,87 €/SRm
25. Lkw-Transport	5.841 €	4,49 €/SRm	6.064 €	4,66 €/SRm
26. Zerkleinerung	10.237 €	7,87 €/SRm	1.106 €	0,85 €/SRm
27. Siebung	1.483 €	1,14 €/SRm	698 €	0,54 €/SRm
28. Gesamt	23.408 €	18,00 €/SRm	26.648 €	20,49 €/SRm

Die Kalkulation beruht darauf, dass, wie dies auch im tatsächlichen Einsatz der Fall war, zwei Abrollkipperzüge das gehackte Holz abfahren. Zieht man jedoch weitere Lkw hinzu, lassen sich die Kosten für Kette 1 noch weiter auf 18170 Euro reduzieren, da eine derartige Konstellation die Wartezeit für den Hacker verringert. Die kalkulierten Gesamtkosten erhöhen sich dagegen deutlich, wenn lediglich ein Lkw die Arbeit verrichtet. Vor diesem Hintergrund beträgt die Differenz der Kosten von Kette 1 und Kette 2 dann 16009 Euro, um die Kette 2 günstiger ist.

6.1.3 Überprüfung des Modells am Beispiel 3: Fichtenrestholz nach Kahlschlag

In Beispiel 3 erfolgt die Bereitstellung des Restholzes der Bereitstellungskette 2 entsprechend durch Bündelung der Baumkronen und der übrigen Hiebsreste. Die Rückung der Bündel geschah unmittelbar im Anschluss an die Bündelung, indem die Bündel hangabwärts entlang eines Waldweges in zwei Poltern aufgesetzt wurden. Der Abtransport der 696 Bündel erfolgte nach neunmonatiger Lagerung durch einen Kurzholz-Lkw zu einem zentralen Holzlagerplatz, der sich in einer Entfernung von 39 Kilometern befand. Insgesamt wurden 33,5 Betriebsstunden für die Bündelung benötigt, was eine durchschnittliche Produktivität von 20,8 Bündeln je Betriebsstunde ergibt (s. Tabelle 82). Die Leistung des Bündlers schätzt das Modell somit recht gut bei einer Abweichung von fünf Prozent nach unten ein.

Trotz der teilweise steilen Geländebedingungen im realen Fall und der mittleren Ruckeentfernung von 400 Metern mussten lediglich 19,5 Betriebsstunden für die Tätigkeit ‚Rücken‘ aufgebracht werden, was einer Durchschnittsleistung von circa 36 Bündeln je Betriebsstunde gleichkommt. An dieser Stelle setzt das Modell die Effizienz der Arbeitenden mit einer Produktivität von 24,9 Stück je MAS als zu gering an (vgl. Tabelle 82).

Aufgrund der Lage der Flächen in einem geschlossenen Waldgebiet und der teils steilen Geländebedingungen sind relativ lange Walfahrten beim Bündeltransport zwingend. Da bei diesen insgesamt deutlich niedrigere Fahrgeschwindigkeiten erreicht werden als bei Straßenfahrten (BROKMEIER, 2013A; FRIES, 2009), verwundert es nicht, dass die durchschnittliche

Transportkapazität unter Realbedingungen mit 13 Bündeln je Betriebsstunde etwa 25 Prozent unter dem vom Modell berechneten Leistungswert liegt.

Tabelle 82: Bereitstellungskettenvergleich: Leistungsdaten von Praxisbeispiel 3.

B3 Leistung	Kette 1	Kette 2	IST
18. Bündeln	----	19,7 St./MAS	20,8 St./BS
19. Rücken	17,8 SRm/MAS	24,9 St./MAS	35,7 St./BS
20. Lkw-Transport	15,4 SRm/MAS	17,2 St./MAS	13,0 St./BS
21. Zerkleinerung	50,0 SRm/MAS	71,0 St./MAS	68,7 St./BS
22. Siebung	85,2 SRm/MAS	71,0 St./MAS	k. A.

Die Kostenkalkulation beim Vergleich fällt zugunsten der Bereitstellungskette 2 aus: Mit gut 11 Tausend Euro sind die kalkulierten Ausgaben etwa 13 Prozent geringer als bei Kette 1.

Tabelle 83: Bereitstellungskettenvergleich: Kosten der einzelnen Arbeitsverfahren und Gesamtkosten für Beispiel 3.

C3 Kosten	Kette 1		Kette 2	
23. Bündeln	----	----	4.586 €	5,49 €/SRm
24. Rücken	5.847 €	7,00 €/SRm	2.436 €	2,92 €/SRm
25. Lkw-Transport	2.844 €	3,41 €/SRm	2.714 €	3,25 €/SRm
26. Zerkleinerung	4.840 €	5,80 €/SRm	1.141 €	1,37 €/SRm
27. Siebung	952 €	1,14 €/SRm	448 €	0,54 €/SRm
28. Gesamt	14.483 €	17,35 €/SRm	11.325 €	13,57 €/SRm

Um die veranschlagten Ausgaben für Kette 1 zu minimieren, müsste die Anzahl der gleichzeitig eingesetzten Lkw auf drei erhöht werden, wodurch sich die Gesamtkosten aufgrund der nun geringeren Wartezeiten für den Hacker um 1823 Euro reduzieren. Die Kosten für den Transport erhöhen sich in diesem Fall nicht, da die Anzahl der notwendigen Touren konstant bleibt und keine Wartezeiten bei den Lkw entstehen.

Insgesamt zeigt sich, dass das Modell geeignet ist, um konkrete Praxiseinsätze vorauszukalkulieren. Dabei bietet es die Möglichkeit zwischen den beiden Bereitstellungsketten zu vergleichen. Es lässt sich auch unter variierenden Rahmenbedingungen anwenden und liefert eine konkrete Entscheidungshilfe.

Jedoch zeigt das Modell auch Schwächen. Insbesondere dort, wo der Untersuchungsumfang gering ist, gibt es teils deutliche Unterschiede zwischen der kalkulierten und tatsächlichen Produktivität einzelner Prozesse (vgl. kalkulierte Bündelleistung unter ‚Normalbedingungen‘ in Kapitel 6.1.1). Aber auch für diese Einsatzbereiche können dem Anwender mit Hilfe der Modellergebnisse entscheidende Informationen an die Hand gegeben werden, da die grundsätzlichen Vor- und Nachteile der Bereitstellungsketten ersichtlich werden.

6.2 Sensitivitätsanalyse

Im Rahmen einer Sensitivitätsanalyse der Durchschnittskosten für die beiden Bereitstellungsketten werden mit dem Modell unterschiedliche Variablen getestet, unter Beibehaltung der sonstigen Eingangsgrößen (*ceteris paribus*). Hierzu werden die Eingangswerte zur Durchführung des Vergleichs (vgl. Kapitel 6.1) fiktiv festgelegt (s. Tabelle 84), um einen durchschnittlichen Einsatz zu simulieren.

Tabelle 84: Bereitstellungskettenvergleich: Eingangsdaten für die Sensitivitätsanalyse.

A Eingangsdaten			Fiktiv
1.	Restholz	Menge	800 SRm
2.		Baumart	Nadel
3.		Vortrocknung	Ja
4.	Bestand	Rückeentfernung	300
5.		Geländeneigung	2
6.		Erntevorbereitung	1 (ja)
7.		Rundholzanfall	300 Efm/ha
8.	Restholz- bündler	Zopfdurchmesser	10 cm
9.		Trägerfahrzeug	Kombi
10.		Einsatzgebiet	Windwurf
11.	Mobilhacker	Betriebsstunden	k. A.
12.	Hackgut- transport	Platzverhältnisse	Mittel
13.		Anzahl Lkw	3
14.		Anhänger	Ja
15.	dT		50 km
16.	St. Zerklein.	Antriebsart	Elektro
17.	Hackgut	Siebung	Ja

Bei der Betrachtung der kalkulierten Leistungsdaten (s. Tabelle 85) fällt der Unterschied der Rückeleistung besonders auf. Die Produktivität beim Rücken der Bündel ist nahezu doppelt so groß wie jene des losen Schlagabraums. Hinsichtlich der Leistungsdaten beim Lkw Transport zeigt sich lediglich ein minimaler Unterschied zwischen den beiden Bereitstellungsketten, obwohl der durchschnittliche Zeitverbrauch beim Hackschnitzeltransport 4,5 Stunden beträgt, während für den Bündeltransport 3,2 Stunden je Tour aufgebracht werden müssen. Hierbei kommt die bessere Ausnutzung der Nutzlast beim Hackschnitzeltransport zum Tragen, da der Abrollkipper 72 Schüttraummeter je Tour mitführen kann (Kurzholzzug: 60 SRm/Tour). Auf Grund der Vielzahl der Transportfahrten (14 Touren Bündel- bzw. 12 Touren Hackschnitzeltransport) gleicht sich dieser Umstand dann wieder aus, so dass für die gesamte Maßnahme kaum ein Unterschied hinsichtlich der Leistungsdaten beim Straßentransport auszumachen ist.

Tabelle 85: Bereitstellungskettenvergleich: Leistungsdaten für die Sensitivitätsanalyse.

Bf Leistung	Kette 1	Kette 2
18. Bündeln	----	13,8 St./MAS
19. Rücken	16,7 SRm/MAS	33,5 St./MAS
20. Lkw-Transport	14,8 SRm/MAS	14,9 St./MAS
21. Zerkleinerung	50,0 SRm/MAS	71,0 St./MAS
22. Siebung	85,2 SRm/MAS	71,0 St./MAS

Die Durchschnittskosten der beiden Bereitstellungsalternativen differieren um circa 1 Euro je Schüttraummeter. Trotz der höheren Aufwendungen beim Rücken und der Zerkleinerung des Waldrestholzes im Wald kann der Mehraufwand durch das Bündeln in Kette 2 nicht kompensiert werden (s. Tabelle 86). Die relative Abweichung der kalkulatorischen Gesamtkosten zwischen den beiden Alternativen beträgt sieben Prozent und ist von vielen weiteren Faktoren beeinflussbar. Fraglich ist, ob dieser geringe Unterschied ausreichen kann, um sich bei der Auswahl der geeigneten Bereitstellungskette beeinflussen zu lassen.

Tabelle 86: Bereitstellungskettenvergleich: Kosten der einzelnen Arbeitsverfahren für die Sensitivitätsanalyse.

Cf Kosten	Kette 1		Kette 2	
23. Bündeln	----	----	6.285 €	7,86 €/SRm
24. Rücken	4.170 €	5,21 €/SRm	1.737 €	2,17 €/SRm
25. Lkw-Transport	3.140 €	3,92 €/SRm	3.125 €	3,91 €/SRm
26. Zerkleinerung	3.218 €	4,02 €/SRm	681 €	0,85 €/SRm
27. Siebung	912 €	1,14 €/SRm	429 €	0,54 €/SRm
28. Gesamt	11.440 €	14,30 €/SRm	12.257 €	15,32 €/SRm

Die Kosten für das Sieben der Hackschnitzel fällt bei Bereitstellungskette 1 mit 1,14 Euro je Schüttraummeter mehr als doppelt so hoch aus wie bei Kette 2. Hier wird unterstellt, dass Zerkleinerung und Siebklassierung an unterschiedlichen Orten stattfinden und daher eine Manipulation der Hackschnitzel mit einem Lader notwendig ist, was entsprechende Zusatzkosten erzeugt.

6.2.1 Abhängigkeit der Durchschnittskosten von der Transportentfernung

Eine größere Transportentfernung zwischen Wald und dem Ort der Holzverwendung führt zwangsweise zu höheren Durchschnittskosten bei der Bereitstellung. Bei der Zerkleinerung im Wald variieren die Durchschnittskosten je nach Höhe der Transportkapazitäten. Da die Festlegung der jährlichen Einsatzdauer des mobilen Hackers in Abhängigkeit von der tatsächlichen produktiven Zeit erfolgt (vgl. Formel (6), Kapitel 5.2.2), verstärken Wartezeiten, beispielsweise als Folge schlechter Organisation, die Kostenzunahme. Unter Berücksichtigung der wechselnden jährlichen Einsatzzeit des Hackers ergeben sich im vorliegenden Beispiel bei einer Transportentfernung bis 12 Kilometern die geringsten Kosten durch den Einsatz von zwei Lkw gleichzeitig. Bei einer größeren Distanz existieren deutliche Kostenvorteile durch

die Verwendung von drei Lkw, obwohl Wartezeiten bei diesen dann nicht zu verhindern sind. Ab 35 Kilometern kommt es erneut zu Unterbrechungen beim Hacker durch fehlende Transportkapazitäten. Die entstehenden Kosten fallen jedoch zu gering aus, als dass sie die Aufwendungen für den Einsatz eines weiteren Lkw rechtfertigen könnten. Erst ab 55 Kilometern ist es günstiger einen vierten Lkw gleichzeitig zu verwenden.

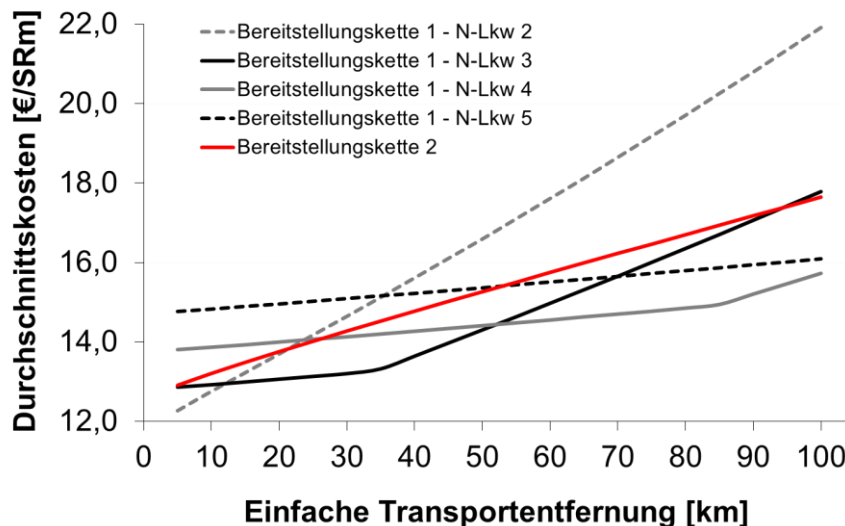


Abbildung 44: Durchschnittskosten der Bereitstellungsketten in Abhängigkeit der Anzahl gleichzeitig eingesetzter Lkw sowie der Transportentfernung.

Obwohl der Hacker die höchsten Maschinenkosten je Einsatzstunde verursacht und damit die teuerste Maschine in der Bereitstellungskette ist, müssen die Kosten für die Wartezeit im Sinne einer Kosteneffizienz in Kauf genommen werden (s. Tabelle 87). Dabei wird unterstellt, dass sich die Höhe der relativen Wartezeit des Hackers in diesem Beispiel auf alle weiteren Einsätze überträgt. Man kann jedoch davon ausgehen, dass zumindest ein Teil der Wartezeit beispielsweise durch Verlängerung der täglichen Arbeitszeit des Maschinenführers kompensiert wird. Für den vorliegenden Fall zeigt sich ebenfalls, dass stets Wartezeiten, je nach Transportkapazitäten beim Hacker oder den Lkw, entstehen. Die günstigste Alternative ergibt sich dabei nicht zwangsweise daraus, dass die zur Auslastung des Hackers benötigte Anzahl an Transportfahrzeugen eingesetzt wird, da die Summe der Maschinenkosten der Lkw, die des Hackers übersteigen können.

Tabelle 87: Anzahl gleichzeitig eingesetzter Lkw und deren Einfluss auf Wartezeiten (Z_w) für Lkw und Hacker (H) bei der Bereitstellungskette 1 sowie die Durchschnittskosten im vorliegenden Fall.

Anzahl Lkw	Z_w (Lkw)	Z_w (H)	Ø Kosten
2 Lkw	0 min	663 min	17,07 €
3 Lkw	0 min	122 min	14,30 €
4 Lkw	594 min	0 min	14,45 €
5 Lkw	1.554 min	0 min	15,40 €

Das Modell gibt für frische Laubholzhackschnitzel (vgl. Eingangsparameter, s. Tabelle 84) eine Schüttdichte von 446 Kilogramm je Schüttraummeter vor. Die Nutzlast für den berechneten Abrollkipper-Gliederzug wird mit 20 Tonnen angegeben. Somit beträgt das theoretische maximale Ladevolumen circa 45 Schüttraummeter pro Fuhre und 18 Fahrten sind mindestens notwendig, um das Holz vollständig abzufahren. Auf Grund der geringen Auslastung steigen die Durchschnittskosten mit jedem zusätzlichen Kilometer Transportentfernung um circa 12 Cent je Schüttraummeter an. Unter diesen Bedingungen ist ab einer Entfernung von 15 Kilometern die Bereitstellungskette 2 ökonomisch vorteilhaft (s. Abbildung 45).

Tabelle 88: Wartezeiten (Z_w) des Hackers (H) in Abhängigkeit der Transportentfernung (dT) und der Anzahl gleichzeitig eingesetzter Lkw.

Anzahl Lkw	Wartezeiten
≤ 2 Lkw	$dT > 0 \text{ km} \rightarrow Z_w(H) > 0$
3 Lkw	$0 < dT < 34 \text{ km} \rightarrow Z_w(H) = 0$
4 Lkw	$0 < dT < 78 \text{ km} \rightarrow Z_w(H) = 0$
5 Lkw	$0 < dT < 125 \text{ km} \rightarrow Z_w(H) = 0$

Durch den zeitgleichen Einsatz von zwei Lkw entstehen bei der angenommenen Transportentfernung grundsätzlich Wartezeiten beim Hacker (s. Tabelle 88). Unter Zugrundelegung der übrigen Parameter in diesem Beispiel ist es möglich mit drei Lkw bei Transportentfernungen bis 34 sowie mit vier oder fünf Lkw zwischen 35 und 125 Kilometern ohne Wartezeiten beim Hacker auszukommen.

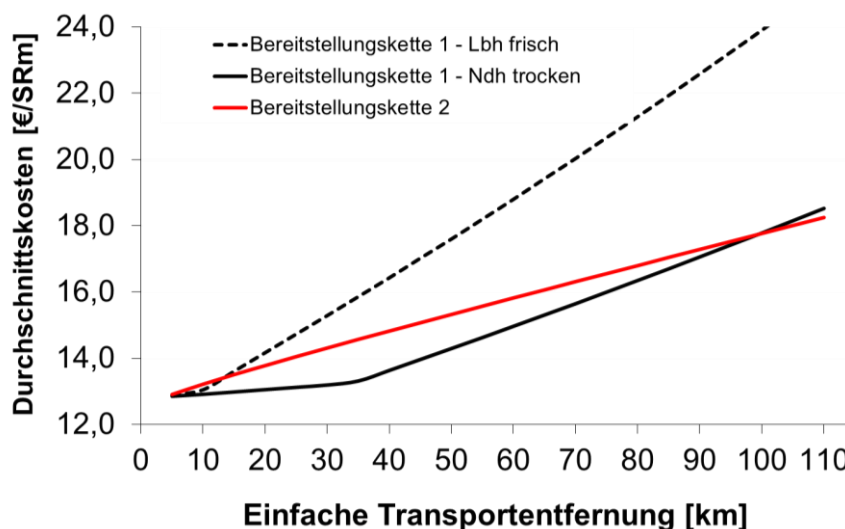


Abbildung 45: Durchschnittskosten der Bereitstellungsketten in Abhängigkeit der Ladungsmasse sowie der Transportentfernung.

In Abbildung 45 wird die Kostensteigerung der Bereitstellungskette 1 durch die höhere Masse der nicht vorgetrockneten Laubholzhackschnitzel in der gestrichelten Linie ersichtlich. Bei der Bereitstellungskette 2 weichen die Modellergebnisse unter diesen Bedingungen nicht von denen bei trockenem Nadelholz ab, so dass das höhere spezifische Gewicht vom Laubholz

nicht zu Veränderungen bei Leistung und Kosten beim Bündelverfahren führt. Man erkennt, dass die Kette 2 ab einer Distanz von 15 Kilometern ökonomisch im Vorteil ist. Außerdem wird deutlich, dass ab einer einfachen Transportentfernung von 95 Kilometern und unter Beibehaltung der übrigen Eingangsparameter die Bereitstellungsvariante der mobilen Zerkleinerung, auch bei besserer Ausnutzung der Nutzlast durch den Transport von Hackschnitzeln mit einer geringeren spezifischen Masse (durchgezogene Linie), höhere Durchschnittskosten aufweist.

Die Transportentfernung ist somit ein wesentlicher Einflussfaktor auf die Kosten bei der Bereitstellung von Waldrestholz. Es wird deutlich, dass mit zunehmender Entfernung der Organisationsaufwand bei der Bereitstellungskette 1 steigt. Dabei nimmt das wirtschaftliche Risiko durch unkalkulierbare Ereignisse zu. Die Herausforderung besteht darin für jeden Einsatz und unter wechselnden Rahmenbedingungen die optimale Transportlogistik bereithalten zu können. Dies stellt eine Herausforderung an den Unternehmer dar. Daher wird es unter Einsatzbedingungen kaum zu verhindern sein, dass eine nicht optimale Maschinenkonstellation verwendet wird. Durch die Eingabe individueller Daten kann der Bereitstellungsvergleich jedoch an die jeweiligen Verhältnisse angepasst werden und liefert eine zuverlässige Vorkalkulation.

6.2.2 Abhängigkeit der Durchschnittskosten von der Produktivität beim Bündeln

Der Restholzbündler stellt im vorliegenden Fall den teuersten Teilprozess der Bereitstellungskette 2 dar, welcher maßgeblich durch die Produktivität der Maschine beeinflusst wird. Die Leistung beim Bündeln müsste auf circa 16 Stück je MAS steigen (vgl. Tabelle 80, s. Abbildung 46), um den wirtschaftlichen Vorteil der Bereitstellungskette 1 in diesem Beispiel auszugleichen.

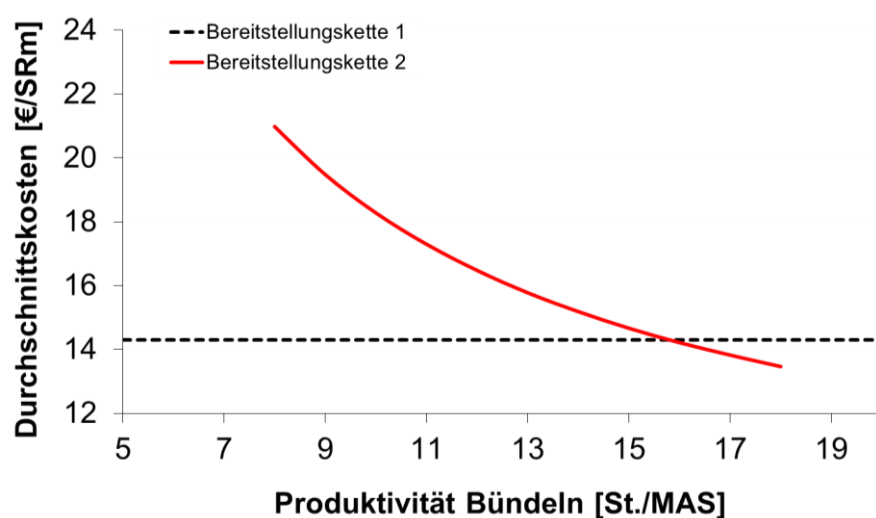


Abbildung 46: Durchschnittskosten für Bereitstellungskette 2 bei unterschiedlichen Leistungen beim Bündeln (gestr. Linie: Bereitstellungskette 1 analog Beispieldaten).

Die Produktivität beim Teilprozess Bündeln kann durch eine unterschiedliche Aushaltung bei der Holzernte beeinflusst werden (s. Abbildung 47). Durch eine Verschiebung der Ausformungsgrenzen zu Gunsten des Restholzes wird eine Leistungssteigerung erreicht. Die gilt im vorliegenden Beispiel bis zu einem Zopfdurchmesser von 12 Zentimetern. Bei größeren Dimensionen nimmt die Leistung wieder ab.

Deutlich wird die Zunahme der Durchschnittskosten, wenn das verwendete Waldrestholz nicht bei der Holzernte vorkonzentriert und für die weitere Nutzung vorbereitet wird. Bei schwachen Dimensionen der Hiebsreste wirkt sich dieser Umstand besonders stark aus, so dass in diesem Fall die Differenz der Durchschnittskosten, im Vergleich zu der Ente vorkonzentrierter Hiebsreste, über fünf Euro je Schüttraummeter beträgt.

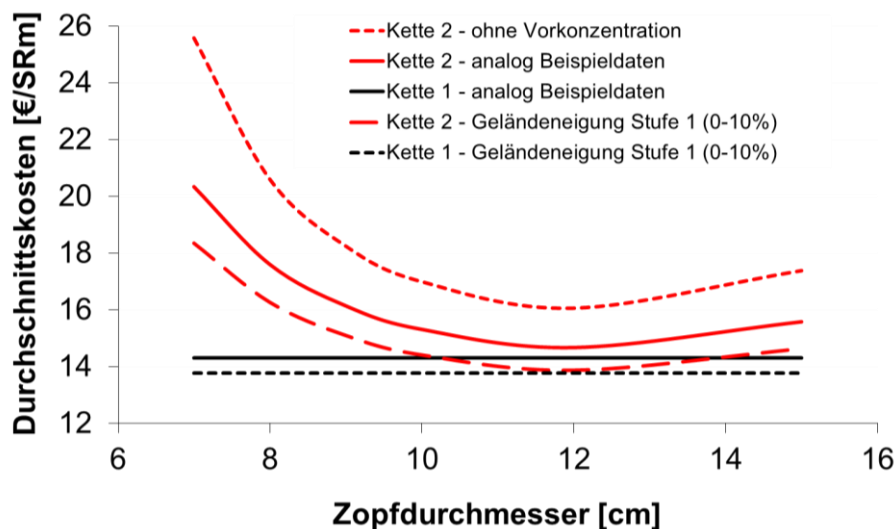


Abbildung 47: Der Einfluss veränderter Variablen auf die Arbeitsleistung beim Bündeln im Vergleich zur Zerkleinerung im Wald.

Wie zu erwarten steigt die Produktivität im flachen Gelände an. In Abbildung 47 werden die Durchschnittskosten ersichtlich, wenn man kalkulatorisch eine geringere Geländeneigung für das gegenwärtige Beispiel annimmt. Die Durchschnittskosten bei der Bereitstellungskette 2 fallen am günstigsten aus, wenn das Waldrestholz vorkonzentriert ist und die Aushaltung einen Zopfdurchmesser von 12 Zentimetern vorgibt. Unter diesen Rahmenbedingungen ist die Bereitstellungskette 2 aus ökonomischer Sicht nahezu konkurrenzfähig mit Kette 1.

Das vorangegangene Beispiel zeigt, dass bereits kleine Veränderungen in der Ausgangssituation Einfluss auf das wirtschaftliche Ergebnis haben. Daher muss der Unternehmer sich die Rahmenbedingungen seiner Einsätze genau anschauen und analysieren. Bei einer guten Arbeitsvorbereitung (Vorkonzentration des Restholzes, Anpassung der Zopfdurchmesser etc.) muss er nicht zwangsweise das Bereitstellungsverfahren wechseln, um bei geänderten Rahmenbedingungen die günstigere Alternative einsetzen zu können.

6.2.3 Abhängigkeit der Durchschnittskosten vom Gesamtholzvolumen

Das Gesamtholzvolumen hat nicht nur direkten Einfluss auf die absoluten Kosten der Maßnahme, sondern auch auf die Durchschnittskosten (s. Abbildung 48). Die größten Unterschiede werden bei der Bereitstellungskette 1 deutlich. Hier steigen die Durchschnittskosten um sieben Euro, wenn das Gesamtholzvolumen von 200 auf 100 Schüttraummeter je Einsatzort reduziert wird. Ab 180 Schüttraummeter je Maßnahme ist, unter Zugrundelegung dieser fiktiven Beispieldaten, die mobile Zerkleinerung die günstigere Bereitstellungsalternative. Lediglich bei 300 Schüttraummetern können durch Optimierung der Abläufe und Hinzuziehen eines weiteren Lkw, im Vergleich zu den Eingangsdaten im vorliegenden Fall, die Durchschnittskosten reduziert werden.

Anders sieht es aus, wenn sich die Transportentfernung erhöht. Steigt diese auf 70, anstelle der bisher unterstellten 50 Kilometer, kann es durch unzureichende Transportkapazitäten in Bezug auf das Gesamtholzvolumen (in diesem Fall 300 SRm) zu höheren Durchschnittskosten bei der Zerkleinerung im Wald kommen, so dass Bereitstellungskette 2 die günstigere Alternative darstellt.

Auffällig ist der wellenförmige Verlauf der Kurve, die die Durchschnittskosten der Bereitstellungskette 1 bei Zunahme der Holzmengen abbildet. So kann der Unterschied bei Zu- und Abnahme des Holzvolumens um 100 Schüttraummeter durchaus einen Euro je Schüttraummeter betragen.

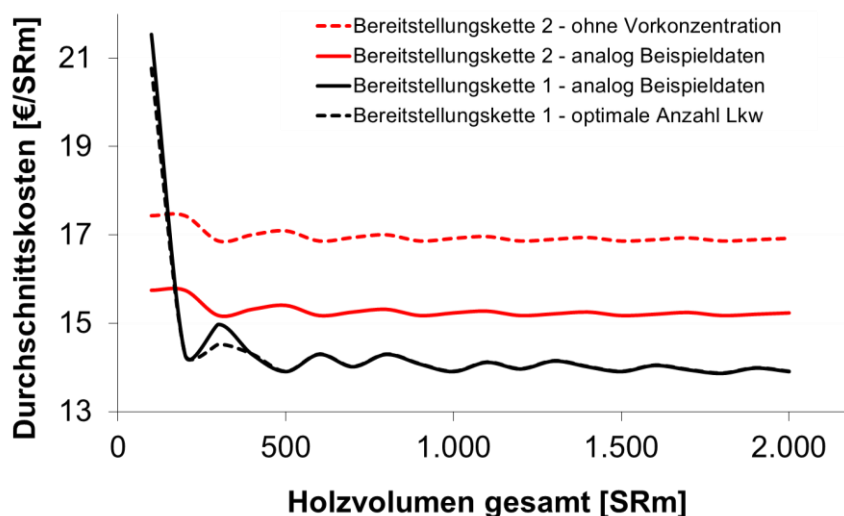


Abbildung 48: Durchschnittskosten der Bereitstellungsketten in Abhängigkeit des Gesamtholzvolumens je Einsatzort.

Sofern bei der Aufarbeitung der Rundholzsortimente auf eine weitere Nutzung des Waldrestholzes geachtet und dieses entsprechend vorkonzentriert wird, lassen sich die Durchschnittskosten bei Kette 2 um 1,68 Euro je Schüttraummeter im vorliegenden Fall senken. Dabei wird dieser Betrag nicht von der Höhe des Gesamtholzvolumens beeinflusst.

Gerade bei kleineren Einsätzen (< 500 SRm je Einsatzort) hat das Gesamtvolumen des Waldrestholzes großen Einfluss auf die Durchschnittskosten. Hierbei lohnt es sich für den

Unternehmer genau hinzusehen, denn die Kostenspreizung kann so beträchtlich sein, dass sich ein falsch kalkulierter Einsatz zum Verlustgeschäft entwickeln kann. Obwohl der Bereitstellungskettenvergleich keine besonderen Rüstzeiten berücksichtigt, wird jedoch deutlich, dass kleine Einsätze, bezogen auf das Waldrestholzvolumen, höhere Durchschnittskosten mit sich bringen. Je größer das Gesamtholzvolumen ist, je weniger variieren die Durchschnittskosten. Obwohl das Bündeln häufig die teuerste Prozessstufe darstellt und empfindlich auf veränderte Einsatzbedingungen reagieren kann (vgl. Kapitel 6.2.3), bietet die gesamte Bereitstellungskette 2 jedoch eine deutlich größere Flexibilität hinsichtlich der Arbeitsorganisation. Veränderungen beim Transport, beispielsweise fehlende Kapazitäten oder falsch kalkulierte Leistungen, wirken sich geringer aus als bei der mobilen Zerkleinerung im Wald.

6.2.4 Abhängigkeit der Durchschnittskosten vom Preis für Dieselkraftstoff

Die Betriebsstoffe haben einen erheblichen Anteil an den Gesamtkosten bei der Bereitstellung von Waldrestholz. Im vorliegenden Fall beträgt der Anteil der kalkulierten Kosten für Diesel an den Gesamtkosten 19 Prozent bei der Bereitstellungskette 1 (2,75 €/SRm) und 15 Prozent bei der Bereitstellungskette 2 (2,26 €/SRm). Wie in Kapitel 5.3.6. gezeigt, fallen beim Einsatz von Zerkleinerungsmaschinen mit einem Elektroantrieb geringere Kosten an als bei einem Antrieb durch Dieselmotoren (s. Abbildung 49). Wird unterstellt, dass bei der stationären Zerkleinerung nicht auf Elektroantriebe zurückgegriffen werden kann, dann steigt der Anteil für Dieselkraftstoff bei der Bereitstellungskette 2 auf 17 Prozent der Gesamtkosten (2,69 €/SRm) an. Dabei werden im Modell Strombezugskosten von 0,15 Euro je Kilowattstunde veranschlagt. Bei Preisen für Strom von mehr als 0,50 Euro je Kilowattstunde übersteigen die Kosten der Zerkleinerung mit Elektroantrieb diejenigen bei der Verwendung von Dieselmotoren³⁷.

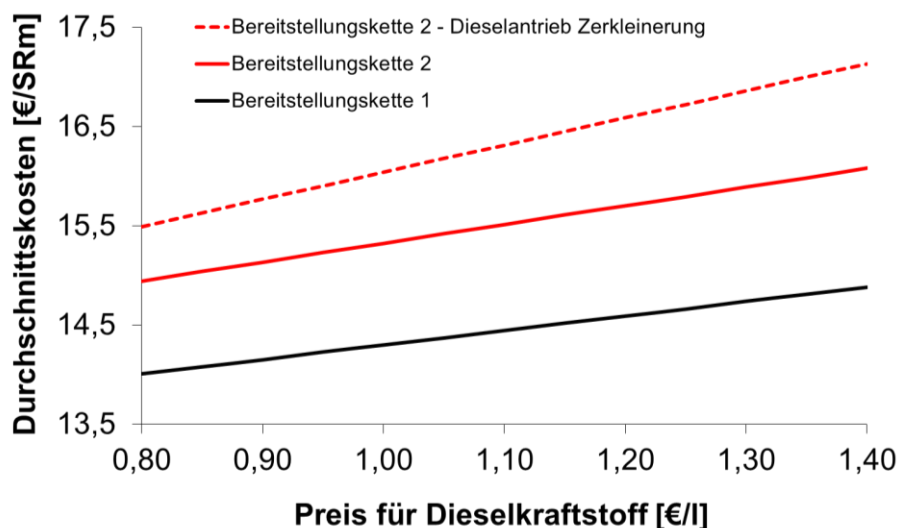


Abbildung 49: Durchschnittskosten der Bereitstellungsketten in Abhängigkeit von den Kosten für Dieselkraftstoff.

³⁷ Referenzwert für den Bezug von Dieselkraftstoff (netto): 1 €/Liter.

Bei Zunahme der Kosten für Dieselmotoren steigen die Durchschnittskosten je nach Bereitstellungskette unterschiedlich an. Bei Verteuerung des Diesels um 10 Cent pro Liter erhöhen sich die Durchschnittskosten bei der Bereitstellungskette 1 um circa 15, während sie bei der anderen Alternative um circa 19 Cent je Schüttraummeter anwachsen. Am deutlichsten ist die Zunahme der Durchschnittskosten bei der Bereitstellungskette 2 zu sehen, wenn anstelle der günstigeren Elektroantriebe Dieselmotoren bei der Zerkleinerung verwendet werden müssen. In diesem Fall ist mit einer Erhöhung der Kosten in Höhe von 27 Cent je Schüttraummeter auszugehen.

Das Modell zum Bereitstellungskettenvergleich bietet die Möglichkeit die Kosten für den Kraftstoffverbrauch vorauszukalkulieren. Damit kann der Unternehmer seine Berechnung an veränderte Preise für Dieselmotoren anpassen. Der Einsatz der stationären Zerkleinerungsanlagen macht deutlich, dass durch die Verwendung elektrischer Antriebe die Durchschnittskosten eines Einsatzes reduziert werden können. Für den mobilen Einsatz im Wald existieren bisher keine Maschinen, die bei der Zerkleinerung auf elektrische Antriebe zurückgreifen können. Dieser Umstand kann sich aus ökonomischer Sicht, insbesondere bei steigenden Kosten für fossile Rohstoffe, nachteilig für die Bereitstellungskette 1 auswirken. Insgesamt zeigt der Bereitstellungskettenvergleich, dass ein Austausch unterschiedlicher Prozessstufen zwischen den beiden Ketten aus wirtschaftlicher und technischer Sicht Nachteile mit sich bringt.

7 Diskussion

7.1 Methodendiskussion

Die Untersuchungen im Rahmen der vorliegenden Arbeit zielen darauf ab, Aussagen zu Zeitbedarfswerten, Arbeitsvolumina, technischer Arbeitsproduktivität und Kosten der aufgeführten Bereitstellungsverfahren zu treffen und eine vergleichende Bewertung vorzunehmen. Eine derartige Begutachtung und die dafür notwendigen Felduntersuchungen stellen spezifische Anforderungen an das Erhebungskonzept. Zwar kann auf existierende methodische Lösungsansätze zurückgegriffen werden, jedoch muss insbesondere bei den Feldstudien gewährleistet sein, dass die angewandten Instrumente praktikabel sind und keinen Einfluss auf die Arbeitsabläufe ausüben. Infolgedessen rekuriert diese Studie auf standardisierte Methoden entsprechender Fachdisziplinen, die auf die Auswertung und den Vergleich definierter, messbarer Größen einer repräsentativen Stichprobe abzielen, um in einem kombinierten Versuchsdesign eine verlässliche Datenbasis zu schaffen (vgl. WITT, 2001). Bei der Datenerhebung kann infolgedessen nicht strukturiert vorgegangen werden, sondern in der Regel wird sich der differenzierten Erfassung individueller Ansichten und Perspektiven bei der Auswertung bedient (vgl. SEEL, 2004).

Es ist das Ziel der Erhebung, die Datenbasis zu erweitern und die vorhandenen Werte zu überprüfen. Zu diesem Zweck muss allerdings zweierlei gegeneinander abgewogen werden: Einerseits ist es notwendig so viele Daten wie möglich zu erheben, andererseits soll der Arbeitsaufwand für die Zielpersonen so geringgehalten werden, dass die Bereitschaft zur Teilnahme erhalten bleibt. Eine fundierte Auswahl der Kriterien ist entsprechend vonnöten. Trotz dieser wird in der Praxis das Ausfüllen der Fragebögen und das damit verbundene Preisgeben der Informationen als lästige und den Betrieb aufhaltende Arbeit angesehen. Folge sind unvollständig oder gar nicht ausgefüllte Protokolle.

Die Nebeneinanderstellung der Forschungsergebnisse bei der Aufteilung der Arbeitszeiten beim Bündeln macht deutlich, dass ein Vergleich der Leistungsdaten aus ablauforientierten Zeitstudien und denen aus langfristigen Beobachtungen, wie Leistungs- beziehungsweise Stundenaufschrieben auf Basis der Betriebsstundenzähler der Maschinen, nur bedingt erfolgsversprechend ist. Die Resultate von Zeitstudien rekurren auf die Beobachtung von Einzelfallsituationen und werden meist unter Optimalbedingungen durchgeführt. Untersuchungen, die nur über eine kurze Dauer getätigt werden können, erheben zudem meist nur einen unzureichenden Anteil allgemeiner Zeiten (vgl. PAUSCH ET AL., 2002). So werden gewisse Arbeitsabläufe nur selten erfasst; dies ist beispielsweise bei Gesprächen mit Einsatzleitern, Förstern und Kollegen, dem Umsetzen zwischen den Einsatzflächen, bei umfangreichen Service- und Reparaturarbeiten der Fall. Der Grund findet sich auch hier zumeist in der Tatsache, dass aufwendige Aufnahmen über einen relativ überschaubaren Zeitraum von bis zu circa 50 Stunden je Einsatzort durchgeführt werden (REUTHER, 2005). Eine Leistungssteigerung der Fahrer rührt des Weiteren auch von der Fremdbeobachtung bei Zeitstudien her, die als Grund für gesteigerte Motivation angesehen wird (HÖMBERG ET AL., 2004). Eine systematische Fehleinschätzung kann in dem Moment die Folge sein, wenn man die Ergebnisse sehr genau aufgelöster Zeitstudien auf die Resultate der Leistungs- und Stundenaufschriebe

dieser Arbeit überträgt (vgl. LÖFFLER, 1992). Derart wiederum können jedoch bekannte Schwächen von einzelnen Zeitstudien über Forsttechnik (vgl. PURFÜRST, 2009; PAUSCH, 2002) in Teilen kompensiert werden, denn die Repräsentativität der quantitativ erfassten Datengrundlage wird erhöht.

Bei der Beurteilung der methodischen Herangehensweise im Kontext der Untersuchungen zum Bündeltransport durch Container-Lkw muss konstatiert werden, dass Arbeitszeitstudien eine detailliertere und qualitativ höherwertigere Betrachtung der Transportzyklen ermöglichen als die Analyse von Leistungsaufschrieben. Jedoch bindet die Arbeitszeitstudie viele Kapazitäten durch den permanenten Einsatz eines Zeitstudiennehmers, wodurch sich grundsätzlich mit weniger Mitteln ein größerer Untersuchungsumfang durch Leistungsaufschriebe erzielen lässt. Auf der anderen Seite besteht bei der Auswertung von Leistungsaufschrieben ein vermehrtes Risiko, dass sich die notwendigen Angaben der Fahrzeugführer als lücken- und fehlerhaft erweisen – begründet können diese Fehlstellen durch Unaufmerksamkeiten wie Vergesslichkeit oder Rundungsfehler sein, es können jedoch auch bewusste Falschangaben zur besseren Darstellung der eigenen Produktivität eingesetzt worden sein.

Beim Ferntransport der Bündel mit Kurzholzzügen erweist sich auf den ersten Blick ein eindeutiger Unterschied beim Zeitverbrauch für das Beladen der Fahrzeuge. Allerdings ist hierbei auch ein Fehler bei der Methodenwahl beziehungsweise der Datenqualität nicht auszuschließen, der für die erhebliche Differenz verantwortlich sein könnte. Zeitaufnahmen sind aufwendig und bedürfen der ständigen Gegenwart eines Zeitnehmers, hierbei ist die Kapazitätsgrenze schnell erreicht und der Datenumfang gestaltet sich vergleichsweise gering. Bei der Analyse von GPS-Aufzeichnungen, wie sie bei BROCKMEIER (2013A), FRIES (2009) und anderen zum Einsatz kommt, ist das Datenkollektiv deutlich größer. Da im Rahmen der Bündeltransporte vor allem der Zeitverbrauch für die Arbeitsschritte Beladung des Fahrzeugs, Ladungssicherung sowie Entladung von Interesse sind, hat sich der Aufwand einer längerfristigen Beobachtung der Transportzyklen durch GPS-Aufzeichnungen in dieser Arbeit nicht gerechnet. Jedoch lassen sich bei Zeitstudiendaten die einzelnen Arbeitsschritte differenzierter betrachten. Wie oben beschrieben, kann es allerdings auch zu einer Verfälschung kommen, da sich in der Gegenwart eines Zeitnehmers die Fahrer unter Druck gesetzt fühlen und eine möglichst fehlerfreie und effiziente Arbeit anstreben.³⁸ Bei den Auswertungen von GPS-Aufzeichnungen können gewiss auch Unsicherheiten und Qualitätsverluste auftreten, die insbesondere die Zuordnung der Daten zu Wegklassen und Arbeitsschritten betrifft. Bei BROCKMEIER (2013A), FRIES (2009) sowie FRIEDL ET AL. (2004) erfolgten die Aufnahmen ohne eine Begleitperson. Trotz zusätzlicher Informationen beispielsweise der Fahrzeugführer lassen die bloßen GPS-Daten eine detaillierte Betrachtung der einzelnen Arbeitsschritte oft nicht zu: Nicht selten werden Stillstandzeiten im Wald mit der Zeit zum Beladen gleichgesetzt. Die vorgenannten Untersuchungen gestatteten es nicht, sachliche und persönliche Verteilzeiten separat darzustellen.

³⁸ Zeitstudieneffekt: Die Ergebnisse aus kurzfristigen Zeitstudien stellen eher die Obergrenze der möglichen Produktivität von Forstmaschinen, bezogen auf die Leistung im langfristigen Praxiseinsatz, dar (vgl. PAUSCH, 2002; HÄBERLE, 1986).

Bei den hiebsweisen Leistungsaufschrieben zur Ermittlung der Produktivität beim Rücken von Schlagabraum ist die Aussagekraft der gewonnenen Daten eingeschränkt, was der Tatsache geschuldet ist, dass weder unterschiedliche Fahrer noch Maschinen zum Einsatz kamen. Die Arbeiten erfolgten lediglich in einem Revier nach einer flächigen Holznutzung. Im Zuge der Pflanzvorbereitung wurden die Flächen, in denen zuvor Harvester das Sturmholz aufgearbeitet hatten, durch Tragschlepper geräumt. Bei diesem Vorgang wurde der vorhandene Schlagabraum, soweit technisch und wirtschaftlich sinnvoll³⁹, von der Fläche zu einem Lkw fähigen Weg transportiert und gepoltet. Anschließend hackte man das Material entweder am Weg oder bündelte es. Die hiebsweisen Leistungsaufschriebe bewirken, dass in der Auswertung bereits Mittelwerte, die sich auf den Hieb beziehen, verglichen werden. Aussagen über Extremwerte können somit nicht getroffen werden.

Bei der Beurteilung der Ergebnisse aus der Auswertung der Leistungsaufschriebe zum mobilen Hacken, ist zu berücksichtigen, dass der Stichprobenumfang mit 22 Arbeitstagen als gering einzustufen ist, insbesondere da lediglich zwei sich ähnelnde Maschinen betrachtet werden. Dennoch spiegelt das Ergebnis die Literaturwerte und die eigene Erfahrung weitestgehend wider, die der Autor dieser Arbeit während seiner beruflichen Tätigkeit sammeln konnte. Darüber hinaus ist der geringe Umfang und damit die Ungenauigkeit in der Aussage für diese Arbeit zu verkraften, da auf die Kosten der gesamten Bereitstellungskette abgezielt wird.

Der Bereitstellungskettenvergleich ist ein adäquates Planungsinstrument zur Abschätzung von Zeitverbrauch und Kosten bei der Bereitstellung von Waldrestholz. Im vorliegenden Fall werden zur Ermittlung der Datengrundlage diverse methodische Ansätze gewählt. In zukünftigen Forschungen sollte eine weitreichendere Datengrundlage geschaffen werden, um damit für alle Prozesse einheitliche Berechnungsgrundlagen, am besten auf der Basis von Modellberechnungen (bspw. Regressionsanalyse, vgl. Kapitel 5.3.1), zur Verfügung zu stellen. In der vorliegenden Arbeit sollte exemplarisch der unterschiedliche Ansatz einer zentralen Zerkleinerung zu der in Deutschland üblichen, mobilen Aufbereitung verdeutlicht werden. Durch den modularen Aufbau und die singuläre Darstellung der Einzelprozesse lassen sich diese mithilfe des Bereitstellungskettenvergleichs jedoch zu weiteren Verfahren kombinieren.

7.2 Ergebnisdiskussion Zerkleinerung im Wald

7.2.1 Teilprozess Rückung Schlagabraum

Grundsätzlich können für die Rückung von Schlagabraum die gleichen Maschinentypen eingesetzt werden wie bei der Kurzholzurückung, so auch bei den Feldversuchen in dieser Arbeit (s. Kapitel 5.2.1). Im Gegensatz zum Rundholz hat Schlagabraum eine deutlich geringere Lagerungsdichte (HAKKILA, 2004; RANTA, 2002; PATZAK 1984B), was dazu führt, dass in der Regel das Volumen und nicht die Masse der Ladung, die maximale Auslastung beschränkt (KÄRHÄ ET AL., 2006). Dieses Problem verstärkt sich, je unförmiger das zu transportierende Material sich ausnimmt sowie mit abnehmendem Volumen des Einzelstücks. Im Rahmen von hiebs-

³⁹ Ermessenssache des Maschinenführers.

weisen Leistungsaufschrieben konnte dabei in der vorliegenden Arbeit ein durchschnittliches Ladevolumen des Tragschleppers von etwa acht Schüttraummeter je Fuhre festgestellt werden. Nur in wenigen Publikationen lassen sich diese Angaben über das durchschnittliche Ladevolumen beim Rücken von Schlagabraum überprüfen. Eine Ausnahme bildet die Studie von STERNER aus dem Jahr 2004, die abhängig von Bestand und Einschlagsintensität ein Ladevolumen von 5,3 bis 7,8; im Mittel 6,2 Schüttraummeter pro Fuhre anführt. Insgesamt dokumentierte STERNER 206 Fuhren auf acht Flächen. EBERHARDINGER (2011) konstatiert hingegen je nach Fahrer zwischen sechs und 25 Schüttraummeter pro Fahrt, wobei er 33 Fuhren auf zwei Flächen in seine Analysen miteinbezog. Auffällig ist der hohe Kronenfußdurchmesser (Zopf) von 17,4 beziehungsweise 20,4 Zentimeter in seiner Untersuchung, STERNER (2004) gibt im Gegensatz dazu das Kronenmaterial aus Durchforstungen in Jungbeständen mit einem BHD des ausscheidenden Bestandes von 15 bis 20 Zentimeter an.

Obwohl, bedingt durch die Verwendung unterschiedlich großer Forwarder, eine erhebliche Differenz hinsichtlich des maximalen Ladevolumens und der maximalen Nutzlast vorliegt, werden diese Parameter bei vielen Forschungsvorhaben über die Rückung von Schlagabraum kaum oder gar nicht berücksichtigt. Hintergrund dieser Fehlstelle ist, dass in vielen Studien nur ein Maschinentyp oder Maschinen vergleichbarer Größe mehrfach beobachtet werden. Lediglich BAUDISCH ET AL. (2004) und WITTKOPF ET AL. (2003) stellen eine signifikante Differenz zwischen den unterschiedlichen Maschinentypen heraus, demzufolge ein Schlepper mit Rückeanhänger⁴⁰ beim Rücken von Fichtenkronen Produktivitätswerte von 21 Schüttraummeter aufweist, während ein Forwarder unter denselben Bedingungen 38 Schüttraummeter je RAZ erzielt. Durch eine Vergrößerung des Laderaums oder durch eine Verdichtung des Ladeguts kann die Auslastung gesteigert werden (KALLIO ET AL., 2005; AHONEN ET AL., 2000), was jedoch die Gefahr vergrößert, Teile der Ladung während der Fahrt zu verlieren. Auch EBERHARDINGER (2011) schließt sich dieser These der Wissenschaftler an und vergleicht einen Forwarder mit Rungenkorb und einen mit Spezialaufbau⁴¹. Durch Letzteren kann demnach die Nutzlast durch ein größeres Ladevolumen und die Komprimierung um 40 Prozent gegenüber dem Forwarder mit Rungenkorb erhöht werden. Einen Vorteil gemessen an der Produktivität stellt EBERHARDINGER (2011) mit diesem System nicht fest: Sowohl mit Spezialaufbau als auch ohne diesen liegen die ermittelten Produktivitätswerte bei etwa 42 Schüttraummeter pro RAZ.

In der Literatur werden diverse weitere Einflussgrößen auf die Produktivität beim Rücken von Schlagabraum identifiziert. LÜTHY (1997) hat eine umfangreiche Studie zur Produktivität von Forwardern bei der Kurzholzrückung erarbeitet, die in zahlreiche wissenschaftliche Arbeiten (z. B. EBERHARDINGER ET AL., 2009; CREMER, 2008; PAUSCH, 2002) einfließt. Darin stellt er die Abhängigkeit des Stückvolumens sowie der Rückeentfernung und der Anzahl der Sortimente von der Rückeleistung heraus. Nach ZIESAK ET AL. (2004) muss neben dem Stückvolumen auch die Anzahl und die Länge der Sortimente berücksichtigt werden. Da konkrete Angaben zu den Bestandesdaten (bspw. der BHD des ausscheidenden Bestandes oder der

⁴⁰ Ladevolumen: ca. 10 m³.

⁴¹ Mehrere Firmen bieten Spezialaufbauten für Forwarder an (bspw. Ponsse Bio, Wellink PressCollector, ABAB Carrier). Das Verdichten von Waldrestholz mit Hilfe zusammenklappbarer Seitenwände soll die Nutzlast der Forwarder erhöhen (vgl. VOLKAMER ET AL., 2009).

Zopfdurchmesser) bei den hiebsweisen Leistungsaufschrieben in dieser Arbeit fehlen, kann lediglich ein Zusammenhang zwischen der geschätzten mittleren Rückeentfernung und der Produktivität beim Rücken von Schlagabraum hergestellt werden. Da die Rückeentfernung Wirkung auf die Fahrzeit des Forwarders ausübt und der Anteil der Fahrzeit an der RAZ begrenzt ist (SCHULER ET AL., 2007; BODELSCHWINGH, 2005), kann auch die Rückeentfernung nur anteilig als eine von mehreren Variablen die Produktivität beeinflussen. Der Übungsgrad und die persönlichen Fähigkeiten des Maschinenführers haben ebenso Einfluss auf die Produktivität. Der direkte Vergleich zwischen einem geübten und ungeübten Fahrer auf derselben Maschine legt einen Unterschied in der durchschnittlichen Produktivität von etwa 75 Prozent (20 SRm/RAZ) offen (EBERHARDINGER, 2011).

7.2.2 Teilprozess Zerkleinerung

Die durchschnittliche Arbeitsleistung bei den Feldversuchen zur mobilen Zerkleinerung beträgt 45 Schüttraummeter je Betriebsstunde in dieser Arbeit (vgl. Kapitel 5.2.2). In der Fachforschung finden sich unterschiedlichste Werte für die Produktivität, da mannigfaltige Einflussfaktoren existieren. WITTKOPF (2005) geht beispielsweise pauschal von einer Leistung in Höhe von etwa 78 Schüttraummeter pro Maschinenstunde aus (90 SRm/h RAZ) bei einem Zopfdurchmesser des zu zerkleinernden Restholzes von 15 bis 20 Zentimetern und einer Hackermotorleistung von 200 Kilowatt. CREMER (2008) hat in 27 untersuchten Fällen eine mittlere Produktivität von circa 47 Schüttraummeter pro Maschinenstunde feststellen können; der mittlere Zopfdurchmesser bei seinen Untersuchungen beträgt 19 Zentimeter und die mittlere Motorleistung der Hacker 274 Kilowatt. Seine Ergebnisse streuen mit einer Standardabweichung von 27,5 Schüttraummeter pro Maschinenstunde um den Mittelwert. KANZIAN ET AL. (2006B) haben in ihrer Forschung beinahe 1400 Schüttraummeter Waldrestholz zerkleinert, wobei die Leistungsmittelwerte zwischen 51 und 66 Schüttraummeter pro Maschinenstunde schwanken – ein Unterschied zwischen Laub- und Nadelholz hinsichtlich der Produktivität konnte nicht ausgemacht werden. Ein Grund für die schwer vorhersehbaren Hackleistungen liegt in der Komplexität der Einflussvariablen hinsichtlich der Produktivität. Einige Autoren identifizieren das Stückvolumen des zu zerkleinernden Materials oder den Durchmesser des ausscheidenden Bestandes, aus dem das Restholz entnommen wird, als ausschlaggebende Einflussgröße auf die Produktivität (STAMPFER ET AL., 1997). Tatsächlich ist das Spektrum der leistungsbeeinflussenden Variablen jedoch deutlich größer: Hier sind unter anderem auch die Motorleistung des Hackers und vor allem die Arbeitsvorbereitung zu nennen (CREMER, 2008), zudem die Volumengröße der einzelnen Arbeitsplätze - das heißt das Arbeitsvolumen für den Hacker an einem Ort, ohne dass dieser umgesetzt werden muss - sowie die Ausrichtung der Hölzer im Polter zählen. Aber auch der Wassergehalt des zu hackenden Materials hat nach KALLIO ET AL. (2005) eine deutliche Relevanz für die Produktivität, Gleiches gilt für die technischen Spezifikationen des Hackers (Vorschubgeschwindigkeit; Größe des Materialeinlasses etc.). SPINELLI ET AL. (2007) unterstreichen wiederum die Masse und die Form des Hackmaterials (normale Form, krumme Form) als signifikante Faktoren. Im Gegensatz dazu sieht CREMER (2008) die genannten Kriterien kritisch: Er bemerkt auf der Basis seiner Berechnungen keine oder nur schwache statistisch nachweisbare Korrelationen

der einzelnen Variablen auf die Produktivität. Eingeschränkt werden muss die Gültigkeit seiner Erkenntnis durch die Tatsache, dass er nur auf einer kleinen Datengrundlage operierte, dennoch zeigen seine Forschungen deutlich, dass die erhobenen Variablen tatsächlich nur einen geringen Einfluss ausüben. Beispielsweise lassen das Stückvolumen und die Anzahl der zugeführten Holzstücke bei modernen kranbeschickten Hackern keine gleichzeitigen Rückschlüsse auf die Leistung der Hacker zu (WEIXLER ET AL., 1999). Ein Umstand, der sich leicht daran erkennen lässt, dass den Hackern das Material nicht Einzelstammweise, sondern gebündelt, in der Regel bei voller Auslastung des Greiferquerschnitts, zugeführt wird und somit das Stückvolumen an Bedeutung verliert. Es ist gegebenenfalls sogar mit einer Abnahme der Leistung zu rechnen, wenn sich die zugeführten Holzstücke als zu groß beziehungsweise zu sperrig für den Hacker erweisen – eine Beobachtung, die CREMER ET AL. (2007) insbesondere bei Laubholzkronen tätigten.

Bei der Beurteilung der gesamten Bereitstellungskette rücken einige wissenschaftliche Arbeiten den Hackereinsatz mit den Schnittstellen Arbeitsvorbereitung und Materialtransport in den Fokus der Betrachtung (WITTKOPF, 2005; ROHRMOSER ET AL., 2003). Es wird in diesen Fällen, aber auch in der direkten Praxis ständig nach Optimierungsansätzen gesucht, die die Abläufe verbessern sollen. Zwar kann eine gute Arbeitsvorbereitung helfen, die Leistung des Arbeitsverfahrens zu erhöhen, indem zum Beispiel das zu hackende Material optimal vorkonzentriert wird, sie dient aber vor allem dazu, die Auslastung der Hacker zu verbessern. Die Maschinenlaufleistung der Hacker erweist sich als ein ganz entscheidender Faktor bei der Analyse der Bereitstellungskette (EBERHARDINGER, 2011): Eine optimale Organisation hinsichtlich Arbeitsvorbereitung, Maschinenausstattung, Arbeitsablauf und Transportkapazitäten gewährleistet eine hohe Hackerlaufzeit und ist damit ein Garant für Wirtschaftlichkeit. Im Alltag scheitern diese Ansätze jedoch oft an den örtlichen Gegebenheiten und an unkalkulierbaren Vorkommnissen, wozu in erster Linie die Platzverhältnisse vor Ort der Hackung⁴² zählen, gleichsam aber auch unvorhersehbare Arbeitsunterbrechungen durch Maschinendefekte oder im Straßenverkehr steckengebliebene Lkw, deren Folge nicht selten der Komplettausfall der Touren ist. In der Fachliteratur werden die Organisation und der organisatorische Aufwand als Manko des Hackens auf der Waldstraße bezeichnet, Zeitstudien verdeutlichen sogar, dass die Dauer für Umsetzen und Warten 40 bis 60 Prozent der gesamten Arbeitszeit in Anspruch nehmen können (AFFENZELLER ET AL., 2007; CREMER ET AL., 2007; KÖBERLE, 2007; KÜHMAIER ET AL., 2007; SCHULER ET AL., 2007).

Bei der Auswertung der Leistungsaufschriebe im Rahmen der vorliegenden Arbeit zeigt sich, dass die Betriebsstunden der Maschinen lediglich etwa 45 Prozent der Gesamtarbeitszeit ausmachen. Wartezeiten im Betriebsablauf entstehen nahezu ausschließlich aufgrund mangelnder Transportkapazitäten; Unterbrechungen der Hackerarbeiten sind die Folge, da die für die Abfuhr notwendigen Fahrzeuge fehlen. Eine Zwischenlagerung des Hackguts ist in der Regel nicht denkbar, da hierfür das Material vom Boden aufgenommen werden muss und die notwendige technische Ausrüstung (Lader, Kran mit Greifschalen am Lkw) bei der Direktbeladung nicht vor Ort oder gar nicht vorhanden ist. Gründe für fehlende Lieferkapazitäten sind Verzögerungen beim Transport (beispielsweise durch unkalkulierbare Behinderungen im

⁴² Wegebreite, Wendemöglichkeiten etc.

Straßentransport), beim Rangieren oder durch eine zu geringe Anzahl an zur Verfügung stehenden Lkw und Containern. Des Weiteren können die Platzverhältnisse vor Ort eine Pause erzwingen, um zum Beispiel Transportfahrzeuge passieren zu lassen. Oft nutzen die Maschinenführer die entstehenden Zwangspausen, um Service- und Reparaturarbeiten an den Großgeräten durchzuführen oder sie werden als persönliche Verteilzeiten eingesetzt. Auf diese Weise kann zumindest ein Teil der unproduktiven Zeit aufgefangen werden.

Die Kostenberechnung dieser Arbeitsunterbrechungen gestaltet sich jedoch schwierig: Eine Reduzierung der Gesamtleistung der Maschinen pro Jahr ist anzunehmen, da nicht alle Aufträge erwartungsgemäß durchgeführt werden können. Auf jeden Fall nimmt der Quotient aus den Betriebsstunden der Maschine zu den Gesamtstunden der Maschinenführer ab. Aus wirtschaftlicher Sicht muss daher Hackerleistung und Transportkapazität bestmöglich aufeinander abgestimmt sein, was eine sorgfältige Planung und entsprechendes Wissen voraussetzt (vgl. WITTKOPF, 2005).

7.2.3 Teilprozess Hackschnitzeltransport

Die Durchschnittsgeschwindigkeit der drei Alternativen beim Hackschnitzeltransport unterscheidet sich nur geringfügig. Insbesondere die Varianten Schlepper mit zwei Anhängern (36,2 km/h) sowie Gliederzug Container-Lkw (37,1 km/h) differieren kaum. Dies erscheint auf den ersten Blick widersprüchlich, da die maximal zulässige Höchstgeschwindigkeit von 40 Kilometern pro Stunde beim Schlepper und 80 Kilometern pro Stunde bei den Lkw einen größeren Unterschied vermuten lässt. Hier zeigt sich jedoch, dass neben der theoretischen Maximalgeschwindigkeit die Transportdistanz und die Strecken- beziehungsweise Straßenverhältnisse eine große Wirkung auf die Durchschnittsgeschwindigkeit ausüben (EBERHARDINGER, 2011). KANZIAN ET AL. (2006B) begleiteten ebenfalls einen Hackguttransport mit Container-Lkw in ihren Untersuchungen und stellten bei einer mittleren einfachen Transportentfernung von circa acht Kilometern lediglich eine Durchschnittsgeschwindigkeit von 17 km/h fest. Das Fahrzeitmodell für einen Kurzholzzug von FRIEDL ET AL. (2004) stimmt teilweise mit den in der Zeitstudie zum Containertransport gewonnenen Daten überein.

Zu berücksichtigen ist ferner, dass das Mittel der Fahrgeschwindigkeit für Lkw mit Zunahme der Transportentfernung in der Regel steigt, da der Anteil gut ausgebauter Straßen zunimmt (BROKMEIER, 2013A; BODELSCHWINGH, 2005; RANTA, 2002). Insbesondere auf langen Strecken ist somit eine Fahrtzeitverkürzung bei der Verwendung eines Lkws zu vermuten.

Eine weitere Alternative für den professionellen Transport, die in dieser Arbeit nicht untersucht werden konnten, bieten Shuttle-Systeme, wobei hier ein Fahrzeug die einzelnen Container vom Rangierplatz zum Hacker befördert und ein weiteres Fahrzeug die Container am Rangierplatz aufnimmt und zum Abnehmer fährt. Durch Verwendung eines geländegängigen Fahrzeugs für die Waldfahrten kann das Manövrieren vereinfacht werden. Um Wartezeiten beim Hacker zu reduzieren, sollten direkt an der Maschine jeweils zwei Container abgestellt werden, so dass der Hacker beim Abtransport eines Containers sich dem zweiten zuwenden kann und keine Lücke in der Produktionskette entsteht. In der Regel sind hierfür die lokalen

Gegebenheiten jedoch nicht vorhanden, da es sich um enge Waldwege handelt (KANZIAN ET AL., 2006A).

Dennoch hängen auch die Zeiten für die Manipulation der Fahrzeuge insbesondere von den Bedingungen vor Ort ab und lassen keine generellen Rückschlüsse auf die Leistungsfähigkeit des Transportsystems zu. Unter den hier genannten Bedingungen macht das Rangieren und Manipulieren bei den Containerfahrzeugen circa 20 Prozent der Arbeitszeit (RAZ) aus. Verglichen mit KANZIAN ET AL. (2006B), die lediglich drei Prozent der Zeit für die Manipulation der Abrollcontainer veranschlagten, ist der Anteil hier sehr hoch. Allerdings wurde hierbei aufgrund der geringen Transportdistanz einerseits auf die Verwendung eines zweiten Containers verzichtet und andererseits erfolgte die Abfuhr durch einen einzelnen Lkw.

7.3 Ergebnisdiskussion Zerkleinerung am Werk

7.3.1 Teilprozess Bündelung

Die vorliegende Arbeit verfolgt das Ziel zwei grundsätzlich unterschiedliche Verfahrensansätze zur Bereitstellung von Waldrestholz vorzustellen und hinsichtlich der technischen, organisatorischen und monetären Eignung zu beurteilen. Dabei mussten für einige Verfahrensschnitte empirische Daten erhoben werden, während andere ausreichend in der Literatur erforscht sind und somit auf veröffentlichte Studien zurückgegriffen werden kann. Bei weitem nicht alle Studien beschreiben allerdings auch die Kosten für das gesamte Arbeitssystem – vom Aufsammeln des Schlagabraums über Bündeln, Lagerung und Transport bis hin zur Zerkleinerung und Verwendung. Da aber erst durch die Betrachtung des Gesamtvorgangs ein objektiver Vergleich zwischen unterschiedlichen Arbeitssystemen ermöglicht wird, ist die Darstellung der Arbeitsabläufe und der Kosten für die einzelnen Verfahren unentbehrlich. Nur wenige der untersuchten Studien geben Aufschluss über die Gesamtbereitstellungskosten bei der Verwendung von Schlagabraum.

Im Bereich der Bündelung von Waldrestholz sind in den Jahren 2004 bis 2011 zahlreiche Studien entstanden. Hierbei fand bei einer Vielzahl der Untersuchungen in Deutschland (N = 54) die Aufarbeitung des Schlagabraums entlang befestigter Wege statt, wobei das Restholz mit Forwardern von der Fläche an den Lkw-fähigen Weg transportiert, aufgestapelt und dort am Weg gebündelt wurde. Zu erwarten ist eine höhere Produktivität im Vergleich zur Aufarbeitung im Bestand, da sowohl das Einsammeln des Restholzes als auch die Fortbewegung der Maschine entfallen. Die Auswertung der Literatur zeigt jedoch, dass die Leistungsfähigkeit beim Bündeln am Weg ($\bar{x} = 18,2$ St./MAS) um etwa ein Bündel je MAS niedriger ausfällt als bei der Bündelung auf der Fläche ($\bar{x} = 19,1$ St./MAS). Hierfür kommen verschiedene Ursachen in Betracht: Zum einen ist, wie REUTHER (2005) darlegt, der Anteil der Kranarbeit beim Einsammeln der Hiebsreste nicht unbedingt der entscheidende Faktor hinsichtlich des Zeitverbrauches zur Fertigung eines Bündels. Hilfreicher und voranbringender ist die Fähigkeit des Maschinenführers, das Material dosiert und ausgerichtet dem Aggregat zuzuführen, so dass es möglichst kontinuierlich verdichtet werden kann. Zum anderen nimmt der Säge- und Abtrennvorgang einen deutlichen Zeitaufwand in Anspruch: GEWECKE (2004) beziffert diesen mit etwa 20 Prozent der MAS. Insofern kann das Bündeln am Weg sich

durchaus als Nachteil erweisen, wenn beispielsweise mit dem Standardholzgreifer am Forwarder beim Einsammeln der Hiebsreste zu viel Erde und Steine aufgenommen werden. Diese Störstoffe gelangen in die Bündel und erschweren das Abtrennen dieser mit der Kettensäge (s. auch NEFF, 2007). Des Weiteren sollte das Ergebnis nicht darüber hinwegtäuschen, dass die Stichprobe der Produktivitätsanalyse, insbesondere beim Bündeln am Weg, stark eingeschränkt ist. So erfolgten zum Beispiel alle Untersuchungen an derselben Maschine, einem Prototyp, bei der man ein Bündelaggregat von Timberjack auf einen Lkw der Firma MAN aufbaute.⁴³

Wie die Auswertung der Hiebsprotokolle beim Bündeln darlegt, steigt die Produktivität mit zunehmendem Zopfdurchmesser des Restholzes. Aus anderen Forschungsarbeiten ist dagegen wenig über den Einfluss des Mindestzopfdurchmessers auf die genannte Größe bekannt. GEWECKE (2004) und STERNER (2004) ermitteln zwar das durchschnittliche Volumen der Wipfelstücke, allerdings ist ein Rückschluss auf die Leistungsfähigkeit nicht möglich. Hinsichtlich der Effektivität von Hackern kommen SPINELLI ET AL. (2001) zu der Erkenntnis, dass der Zopfdurchmesser eine ausschlaggebende Kenngröße darstellt, wohingegen in anderen Produktivitätsmodellen (WSL, 2007; STAMPFER ET AL., 1997) zumindest eine eindeutige Abhängigkeit der Produktivität vom BHD des ausscheidenden Bestandes gesehen wird. Ob sich zu große Wipfelstücke auch nachteilig auf die Produktivität auswirken, konnte im Rahmen der Untersuchung nicht gezeigt werden. REUTHER (2005) verweist in ihrer Forschung darauf, dass es bei starken Holzstücken zum Einklemmen der Kettensäge beim Abtrennvorgang der Bündel kommen kann.

Weiter kann durch die Auswertung der Hiebsprotokolle gezeigt werden, dass mit zunehmender Geländeneigung die Leistungsfähigkeit beim Bündeln signifikant sinkt. Ein erwartbares Ergebnis, wenn man berücksichtigt, dass der Zeitaufwand im steileren Gelände zunimmt. Zum einen reduziert sich durch den höheren Kraftaufwand die Geschwindigkeit, zum anderen - und dieses fällt deutlich mehr ins Gewicht - verhindert eine zu steile Geländeneigung die Befahrbarkeit einer Rückegasse durch mangelnde Traktion in Gänze, wodurch ein erheblicher Umweg in Kauf zu nehmen ist (vgl. HITTEBECK, 2009). Beim Vergleich der Bündlerleistung mit der Produktivität von Radharvestern und Harvestern mit Raupenlaufwerk im geeigneten Gebiet ist ein so deutlicher Produktivitätsrückgang jedoch nicht zu erwarten. Zu diesem Ergebnis kommen auch STAMPFER ET AL. (2004), die bei Untersuchungen zur Leistung von Harvestern auf geneigten Boden lediglich eine Reduzierung der Leistung von circa fünf Prozent bei einer Hangneigung von 65 Prozent ausmachen können. Ein Grund hierfür stellt wohl die hohe Masse der Bündelaggregate dar, wodurch das Gesamtgewicht der Maschine erhöht wird. Eine weitere Ursache ist die unterschiedliche methodische Herangehensweise: Da im Rahmen der Hiebsprotokolle die Einsatzdauer der Maschinen gemäß der Betriebsstundenzähler abgefragt werden, ist es beispielsweise denkbar, dass die für das Aufziehen der Ketten und / oder Bänder benötigte Zeit nicht separat erfasst wird. STAMPFER ET AL. (2004) erheben ihre Daten auf Basis von Zeitstudien, in denen man diese Arbeiten nicht der produktiven Tätigkeit zuschlug. Die einfache Umrechnung der RAZ in MAS, durch einen Aufschlag von 15 Prozent verzerrt infolgedessen das Ergebnis.

⁴³ Bündler Fiberpac B380 von Timberjack auf einem LKW (MAN TGA 33.480).

Verglichen mit den Ergebnissen aus Zeitstudien sind die, sich aus den Leistungsaufschrieben ergebenden reinen Arbeitszeiten beim Bündeln als niedrig zu bezeichnen. Sowohl KANZIAN (2005), GEWECKE (2004) als auch STERNER (2004) beobachteten mit 69 bis 82 Prozent RAZ an der GAZ höhere Werte für die produktiven Zeiten. Den drei Studien ist gemein, dass die Aufnahmen beim Bündeln auf dem Waldweg mit einem auf Lkw montierten Bündler erfolgten, was den Unterschied der Ergebnisse zumindest zum Teil sachlich begründet: Es entfällt der Zeitfaktor für das Aufziehen der Traktionsbänder und -ketten, die das Vorankommen der Maschine außerhalb der Waldwege gewährleisten. Darüber hinaus geht unter diesen Ausgangsbedingungen das Umsetzen zwischen den Einsatzorten mit dem Lkw zügiger vonstatten. Vergleicht man jedoch die Beobachtungen mit den Resultaten aus Zeitstudien, die im Rahmen einer flächigen Bearbeitung erhoben wurden, notiert die Fachliteratur mit 68 bis 77 Prozent RAZ an der GAZ ebenfalls deutlich höhere Werte. Als Ursache hierfür ist sicherlich auch der methodische Ansatz anzuführen (vgl. Kapitel 7.1).

Die Zeiten für Service und Reparatur beim Bündeln in den betrachteten Exempeln sind, insbesondere verglichen mit anderen Forstmaschinen (bspw. in FRICK ET AL., 2000), als hoch anzusehen, was damit zusammenhängen kann, dass durch das Bündelaggregat neben Garnketten- und Schwertwechsel auch eine erhebliche Menge an beweglichen Teilen zusätzlich gewartet werden muss. Nicht auszuschließen ist allerdings auch, dass die technische Verfügbarkeit der Maschinen noch nicht in der Form gegeben ist wie bei anderer ausgereifterer Forsttechnik.

Insgesamt bewerten viele Veröffentlichungen die Anwendung der Bündlertechnik positiv: So bescheinigt LECHNER (2005) der Technik eine generelle Eignung für den Einsatz auch unter den spezifischen waldbaulichen Bedingungen Mitteleuropas. Nach seiner Auffassung lässt sich das Arbeitssystem problemlos in bekannte Bereitstellungsketten integrieren. Allerdings sehen sowohl LECHNER (2005) als auch andere Autoren wie FINDEISEN ET AL. (2006), KANZIAN (2005) und ROHRMOSER ET AL. (2003) eine wirtschaftliche Bereitstellung von Hackschnitzeln mit Hilfe der Bündeltechnik bei den jeweiligen aktuellen Marktpreisen für Hackschnitzel nur in sehr günstigen Fällen als praktikabel an. Andere Wissenschaftler sehen jedoch ein hohes Optimierungspotential dieser Technik (KANZIAN, 2005; ANDERSSON ET AL., 2000). Lediglich LISS (2003) weist darauf hin, dass bei den Bereitstellungskosten berücksichtigt werden sollte, dass die Bündlertechnik besonders für Abnehmer mit einer großen Lagermöglichkeit und einer stationären Aufbereitung geeignet zu sein scheint, da hierdurch die Kosten des Gesamtprozesses deutlich reduziert werden. Nach CREMER (2008) sind solche Werke in Deutschland jedoch bislang nur selten anzutreffen.

7.3.2 Teilprozess Bündelrückung

Der im Kapitel 5.3.2 herausgestellte signifikante negative Zusammenhang zwischen der Produktivität beim Rücken der Bündel und der Rückeentfernung deckt sich mit den Beobachtungen in der Literatur. Dabei sind Maschinen mit einer höheren Ladekapazität besonders mit zunehmender Rückeentfernung hinsichtlich ihrer Rückeleistung im Vorteil (BODELSCHWINGH, 2005), wobei allerdings in den veröffentlichten Studien nur wenige Kontrollfälle mit kurzen

Rückeentfernungen bis 300 Meter vorliegen. 25 von 46 der ausgewerteten Fälle absolvierten eine Rückeentfernung von 300 Metern und mehr. In der Fachforschung findet sich die Angabe, dass der Fahrvorgang der Maschinen etwa ein Drittel der Arbeitszeit beim Rücken von Kurzholz in Anspruch nimmt (u. a. AFFENZELLER ET AL., 2005; BODELSCHWINGH, 2005; MC NEEL ET AL., 1994). Da insbesondere die Dauer des Ladevorgangs von dem Stückvolumen sowie der Anzahl und Länge der Sortimente abhängt, ist beim Rücken von Bündeln davon auszugehen, dass ein geringerer zeitlicher Aufwand für das Beladen benötigt wird. Infolgedessen ist der Anteil der Fahrbewegungen des Forwarders an der Arbeitszeit und damit der Einfluss der Rückeentfernung auf die Produktivität noch höher einzustufen als bei der Rückung von Stammholz oder von losem Schlagabraum.

Da bei der Rückung von Rundholz das Stückvolumen als wesentlicher Einflussfaktor auf Leistung und Kosten identifiziert wurde (vgl. LÜTHY, 1997), ist aufgrund des hohen Einzelvolumens eines Bündels davon auszugehen, dass insgesamt eine höhere Produktivität beim Rücken von Bündeln erzielt werden kann als beim Rücken von Stammholz (Kurzholz). Um einen Vergleich anzustellen, bietet es sich an, auf die Forschung von CREMER (2008) zurückzugreifen, der ein Produktivitätsmodell für Forwarder beim Rücken von Rundholz erstellte. Sein Modell fußt auf 200 Einzelfällen, wobei sich die Produktivität in Abhängigkeit zum mittleren Bruthöhendurchmesser des ausscheidenden Bestandes auf fünf bis 20 Erntefestmeter je RAZ beläuft. Eine direkte, unproblematische Vergleichbarkeit mit den Ergebnissen der Untersuchung zur Rückung von Bündeln darf nicht vorgenommen werden, da beispielsweise Fichtenstammholz eine etwa doppelt so hohe Rohdichte aufweist wie Fichtenrestholzbündel (vgl. Kapitel 4.1) und des Weiteren eine Stunde RAZ nicht mit der Betriebsstunde einer Maschine gleichgesetzt werden kann. Dennoch ist der Leistungsunterschied derart groß, dass er zumindest Erwähnung finden soll. Bezogen auf die in Tabelle 66 (Kapitel 5.3.2) dargestellten Mittelwerte der Leistungsaufschriebe ist bei Umrechnung eines Bündels in ein Volumenmaß (m^3) eine Effizienz von 30 bis fast 60 Kubikmetern je Stunde und damit die eineinhalb bis dreifache Produktivität im Gegensatz zum Rücken von Stammholz erzielbar.

Verglichen mit einer losen Restholzlagerung ist die Homogenität von Restholzbündeln vorteilhaft, da diese wie Kurzholz gepoltet und gelagert werden können (s. Abbildung 50). Hierdurch kann eine genauere Definition der Lagermenge stattfinden. Diese ist wichtig, um zum einen die Lieferungen zum Abnehmer bedarfsgerecht durchführen zu können und zum anderen um als Basis einer Abrechnung mit den vor- und nachgelagerten Unternehmen zu fungieren. Daher ist es möglich, ähnlich wie es in der Holzindustrie seit jeher praktiziert wird, ein Waldlager aufzubauen. Das Holz wird bedarfsgerecht angeliefert, ohne dass dem Holzabnehmer direkt Kosten für die Lagerung entstehen, solange der Waldbesitzer die kostenlose Lagerung akzeptiert. Zwar ist eine Abschätzung der Holzmengen bei lose gelagertem Waldrestholz grundsätzlich möglich (SITTERBERG, 2014; HUBER, 2013), jedoch treten durch die fallenden Längen weiterhin Unsicherheiten auf.



Abbildung 50: In einem Polter aufgestezte Waldrestholzbündel.

Als Brutmaterial für rindenbrütende Insekten (Borkenkäfer) kommen Bündel weniger in Frage als lose aufgeschüttetes Ast- und Wipfelmateriel (vgl. Kapitel 2.4.1). Zum einen bewirken die Stahlbänder und -walzen des Bündelaggregats eine weitere Rindenverwundung bei der Materialdurchführung und Kompression, zum anderen sind keine Aststücke länger als die Bündel (i. d. R. 3 m), was eine schnelle Abtrocknung vom Astquerschnitt aus bewirkt. Darüber hinaus ist das Material in den Bündeln stark komprimiert, was das Holz im Inneren der Bündel unbrauchbar macht als Brutstätte für die Insekten. Allerdings ist bei einer größeren Anhäufung von frischem Fichtenschlagabraum zu beachten, dass es auf Grund der Ausdünstung des Materials zu einer Anziehung von Schadinsekten kommen kann, da diese absterbendes Material (kranke Bäume) wittern.

7.3.3 Teilprozess Ferntransport der Bündel

Grundsätzlich stellt der Containertransport von Bündeln eine Belieferungsvariante dar, derer sich lediglich in Ausnahmefällen bedient wird. Durch die Tatsache, dass ein zusätzliches Beladefahrzeug benötigt wird, entsteht eine geschlossene Arbeitskette. Die andernfalls geltenden Vorteile durch das Bündeln, die entkoppelte Bereitstellungskette, werden auf diese Weise konterkariert. Zudem wird dieses Vorgehen umso ineffizienter, je weniger Bündel an einem Ort gelagert sind, was sich auch beim Transport von Stammholz durch Sattelaufleger ohne Ladekran gezeigt hat (vgl. FENZ ET AL., 2005).

Im Rahmen der Bündeltransporte mit Rohholztransport-Lkw ist vor allem der Zeitverbrauch für die Arbeitsschritte Beladung des Fahrzeugs, Ladungssicherung sowie Entladung von Interesse, da zu den verbleibenden Aktionen bereits ausreichend viele Untersuchungen zum Holztransport vorliegen (vgl. BROKMEIER, 2013A; FRIES, 2009; KORTEN ET AL., 2009; BODELSCHWINGH, 2005; FRIEDL ET AL., 2004 u. a.). Im Rahmen der Zeitstudien beim Bündeltransport mit Kurzholz-Lkw (vgl. Kapitel 5.3.4) ergibt sich für die Beladung (inkl. Ladungsvorbereitung und -sicherung) ein durchschnittlicher Zeitbedarf von 32 Minuten je Ladevorgang. Dagegen ermittelte FRIES (2009) beispielsweise bei 2226 Ganztouren einen Mittelwert hinsichtlich des Ladens von 47 Minuten, bei STAMPFER ET AL. (1997) finden sich zwar gleichfalls 32 Minuten für einen Ladevorgang von Rundholz, allerdings für das Auf- und Abladen von einem Lkw ohne Anhänger mit 12 Festmetern Ladevolumen. BODELSCHWINGH (2005) stellt das Stückvolumen als maßgeblichen Einflussfaktor für die Geschwindigkeit beim Laden heraus; demnach nimmt die Dauer des Ladevorgangs mit wachsendem Volumen der Einzelstämme ab. Das Volumen der Bündel beträgt etwa 1,15 Kubikmeter pro Stück und damit deutlich mehr als

jenes der gängigen Kurzholzsortimente,⁴⁴ was ursächlich für die schnellere Beladung sein dürfte. Geschickte Kranführer nehmen darüber hinaus mehrfach zwei Bündel gleichzeitig mit dem Greifer auf.

Bei Sammeltouren, also bei Fahrten, bei denen an mindestens zwei Poltern geladen wird, nimmt der Zeitaufwand für Ladungssicherung, das Ausfahren des Krans und der Stützen einen größeren Anteil der Gesamtladezeit ein, als dies bei Ganztouren der Fall ist (FRIES, 2009). Da die Aufnahmen der vorliegenden Arbeit im Alltagsbetrieb und nicht unter Laborbedingungen stattfanden, kam es auch hier zu Sammeltouren. Deren Anteil an der Gesamtheit der Fahrten beläuft sich auf 19 Prozent; ein Wert, der in etwa dem entspricht, was FRIES (2009) bei seiner Untersuchung von Rundholztouren ermittelte. Bei einem Aufnahmeumfang von 2927 Touren lag die Anzahl der Fahrten mit einer Ladestelle bei 2226, was einem Anteil der Sammeltouren von 23,88 Prozent entspricht.

Die durchschnittliche Zuladung bei den Feldversuchen zum Bündeltransport beträgt circa 50 Bündel pro Tour (s. Kapitel 5.3.4). Im Vergleich zu den Ergebnissen einer Studie der finnischen TEKES⁴⁵ fällt der Wert niedrig aus (HAKKILA, 2004), denn diese hatte eine Transportkapazität von 65 Bündeln ermittelt. Die deutlich größere Lademenge kann allerdings als systembedingt betrachtet werden, da in Schweden und Finnland eine zulässige Gesamtmasse eines Lkws von 60 Tonnen erlaubt ist, was einer Verdopplung der Nutzlast entspricht (KORTEN ET AL., 2009). In einer der wenigen Veröffentlichungen zum Transport der Bündel in Mitteleuropa gehen NOLTE ET AL. (2005) davon aus, dass 60 bis 64 Bündel pro Fahrt transportiert werden können. Überprüfen konnten sie die Annahme jedoch nicht. SPINELLI ET AL. (2007) beschreiben das Ladevermögen der Kurzholz-Lkw in diesem Zusammenhang mit 15 Tonnen TS, bei einer Umrechnung von fünf Bündeln pro Tonne TS ergibt sich hieraus mit 75 Bündeln die höchste Ausladung. Dahingegen sehen LECHNER ET AL. (2004) lediglich die Möglichkeit, 36 bis 45 Bündel pro Fuhre zu transportieren. Diese voneinander abweichenden Werte verdeutlichen, dass bisher keine umfangreichen empirischen Belege zum Bündeltransport in Mitteleuropa vorliegen.

7.3.4 Teilprozess stationäre Verarbeitung der Bündel

Die Versuche zum Einsatz der stationären Maschinen haben deren grundsätzliche Eignung nachgewiesen. Mit 113 beziehungsweise 96 Bündeln pro Betriebsstunde lag dabei die Produktivität der Wellenzerkleinerer über der des Hackers (69 St./BS). Beim Vergleich der erzeugten Volumina an Hackgut wird der Leistungsunterschied noch deutlicher. Hier übersteigen die Wellenzerkleinerer die durchschnittliche Produktivität des Hackers um bis zu 100 Schüttraummeter je Stunde. Dieses deutliche Ergebnis ist jedoch auch auf die unterschiedliche Intensität der Zerkleinerung und damit der Stückgröße des zerkleinerten Holzes zurückzuführen (vgl. Kapitel 4.4). Insgesamt ist der Versuchsumfang mit 13 Betriebsstunden als gering zu bezeichnen, so dass nicht alle Einflussgrößen im Ergebnis berücksichtigt wer-

⁴⁴ Im Vergleich: Ein Einzelstamm mit fünf Metern Länge und 30 Zentimetern Mittendurchmesser hat ein Volumen von ca. 0,35 Kubikmeter.

⁴⁵ National Technology Agency, Helsinki.

den können. Es sind deutlich mehr Einzelversuche beziehungsweise Versuchswiederholungen notwendig, um den Effekt einzelner Faktoren genauer bestimmen zu können.

Zur genaueren Beurteilung der Betriebskosten ist neben den Leistungswerten der einzelnen Maschinen auch der Einfluss der Gesamtanlage nebst Förder- und Separationstechnik notwendig. Der simulierte Aufbau kann hierzu nicht die vollständigen Informationen liefern.

Stationäre Anlagen haben die Möglichkeit auf Elektroantriebe zurückgreifen zu können. Wie die Berechnung zum Vergleich der Betriebskosten für Elektro- beziehungsweise Dieselantrieb zeigt, können bei erstgenanntem circa 60 Prozent eingespart werden. Die Überprüfung dieser Angaben konnte im Feldversuch nicht erfolgen, da ausschließlich Dieselantriebe getestet wurden.

Im Gegensatz zur Zerkleinerung im Wald ist es bei der stationären Aufbereitung problemlos möglich eine Siebklassierung einzubinden. Die Feldversuche haben diese grundsätzliche Möglichkeit unterstrichen und einen stabilen Betrieb der kombinierten Anlagen gezeigt. Die Siebanlage hat die Korngrößenverteilung erwartungsgemäß und signifikant, im Vergleich zum Ausgangsmaterial, verändert. Ein Vergleich unterschiedlicher Siebtechniken ist anhand der Feldversuche jedoch nicht möglich, da ausschließlich ein Sternsieb zum Einsatz kam.

7.4 Ergebnisdiskussion Anwendung des Bereitstellungskettenvergleichs

Es existieren nur wenige Modelle zur Abschätzung der Produktivität entlang der gesamten Bereitstellungskette von Waldrestholz, was sicherlich auch auf die Komplexität der Einflussvariablen rückführbar ist. In den meisten Fällen werden Modelle für einzelne Prozessstufen herangezogen und diese in ungeeigneter Weise zu Bereitstellungsketten zusammengesetzt.

7.4.1 Überprüfung des Modelles

Im Beispiel 1 (Kapitel 6.1.1) setzt das Modell die Leistungswerte für das Bündeln von Laubholz im Bestand zu hoch an. Die Schwierigkeit scheint darin zu liegen, dass bei der Erstellung des Modells keine Versuchsergebnisse für eine solche Bestandssituation berücksichtigt werden konnten. Die Bündelung von Laubholz zum einen und das Bündeln im Bestand zum anderen lassen eine Reduzierung der Ertragsfähigkeit beim Bündeln erwarten. Eine Vermutung, für die sich auch Anhaltspunkte in der Praxis finden, da das Laubholz härter und weniger elastisch ist als insbesondere belaubtes Nadelholz. Des Weiteren erfordert das Bündeln im Bestand mehr Aufmerksamkeit seitens des Maschinenführers, da die Gefahr besteht, mit dem Bündelaggregat den verbleibenden Baumbestand zu beschädigen. Aus diesem Grund muss das Aggregat bei Fahrten auf der Rückegasse oft längs in Fahrtrichtung gedreht werden und das Bündeln ist ausschließlich in gewissen Bestandslücken mit ausreichend Platz möglich, was eine Vorkonzentration des Restholzes unabdingbar macht. Es sollte infolgedessen in weiteren Studien überprüft werden, ob das Modell unter diesen Rahmenbedingungen anwendbar bleibt.

Im gleichen Fall wird die Durchschnittsleistung beim Lkw-Transport im Vergleich zum tatsächlichen Einsatz unterschätzt. Die Ursache für die Abweichung lässt sich unter Umständen in der Tatsache finden, dass das Modell von einer Direktbefüllung des stationären Zerkleinerers durch den Kran des Kurzholz-Lkws ausgeht, wodurch sich die Zeit für das Entladen gegenüber der ungestörten Entladung erhöht. Auf der anderen Seite sind anscheinend kaum Wartezeiten und sonstige Rüstzeiten beim Spanplattenwerk angefallen, die andere Autoren (vgl. BROKMEIER, 2013B; FRIES, 2009; BORCHERDING 2007) als erheblich einstufen.

In einem weiteren Beispiel (Kapitel 6.1.2) kann die Modellberechnung der Rückeleistung von Schlagabraum mit den reellen Werten verglichen werden. Dabei wird die Produktivität vom Modell nahezu um 20 Prozent unterschätzt, was insbesondere darauf zurückzuführen ist, dass im Modell ein fester Wert gesetzt ist, der sich lediglich durch die Rückeentfernung und die Geländeneigung beeinflussbar zeigt (s. Kapitel 5.2.3). Somit können in Einzelfällen wie diesem, erhebliche Unterschiede auftreten – eine Tatsache, die durchaus als Schwäche des Modells für den Bereitstellungskettenvergleich anzusehen ist. Je umfangreicher sich die Maßnahme jedoch gestaltet, desto eher wird sich der Modellwert dem tatsächlichen Wert annähern.

Der Modellwert hinsichtlich der Transportleistung wird ebenfalls unterhalb des tatsächlichen Wertes angegeben. Dies kann möglicherweise die Konsequenz einer Fehleinschätzung der Platzverhältnisse darstellen: Nimmt man im Modell die räumlichen Gegebenheiten als ‚gut‘ an, entgegen der vom Autor festgelegten ‚mittleren‘ Platzsituation, erhöht sich die theoretische Leistung auf 15,6 Schüttraummeter je MAS, da unter anderem geringere Zeiten für die Manipulation veranschlagt werden. Dieser Wert weicht lediglich etwa vier Prozent vom tatsächlichen Ergebnis ab.

Trotz einiger Wartezeiten im Praxisbeispiel passen die tatsächliche und vom Modell berechnete Produktivität beim Hacken gut zusammen. Dies verdeutlicht, dass der Hacker im Betrieb mehrfach die optimale Arbeitsproduktivität erreichte. Auf Grund mangelnder Datenbasis liegt der Berechnung der Hackerleistung kein Produktivitätsmodell (bspw. aus einer Regressionsanalyse) zu Grunde. Der im Modell hinterlegte fixe Leistungswert spiegelt zwar die Produktivität des im Praxiseinsatz untersuchten Hackers gut wieder, jedoch ist bei Hackern aus einer anderen Leistungsklasse von abweichenden Ergebnissen auszugehen. Zwar besteht die Möglichkeit den Leistungswert manuell im Modell zu verändern, jedoch sollte in einem weiteren Entwicklungsschritt beispielsweise mit Hilfe des von HÜTTL ET AL. (in KUPTZ ET AL., 2015) entwickelten Modells, welches die technische Arbeitsproduktivität beim Hacken in Abhängigkeit der Leistungsklasse abgeschätzt (korrigiertes $R^2 = 0,4264$), die Genauigkeit verbessert werden.

Zur Rückung von Restholzbündeln gibt es kaum auswertbare Literatur. Daher stammen die Produktivitätswerte im vorliegenden Modell ausschließlich aus den eigenen Untersuchungen des Verfassers. Dabei muss im Beispiel 3 (Kapitel 6.1.3) eine unzureichende Abschätzung der Leistungsparameter konstatiert werden, weitere wissenschaftliche Studien sind notwendig, um die Einflussfaktoren auf die Produktivität beim Rücken von Bündeln und Schlagabraum bestimmen und damit die Leistungsfähigkeit vorhersagen zu können. Ungeklärt bleibt zum Beispiel auch der Einfluss der unterschiedlichen Fahrzeugmodelle hinsichtlich deren

Größe und Leistung auf die Produktivität. Ein auch in Zukunft schwer einzuschätzender Faktor wird sicherlich der arbeitende Mensch selbst sein, dessen Erfahrung und persönliche Einsatzfähigkeit stets schwierig vorherzusagen sind (vgl. BROKMEIER, 2007; VESISENAHO ET AL., 2007; HÜSTER, 1997).

Die Produktivitätsberechnung im Modell setzt fixe Längen für die Waldein- und -ausfahrten an, die, sobald es in der Praxis zu erheblichen Abweichungen von diesen Standards kommt (vgl. Beispiel 3; Kapitel 6.1.3), zu einem irrtümlichen Ergebnis führen. Wenn die Streckenanteile der Waldfahrten an der Gesamtstrecke bekannt sind, können diese allerdings auch zur genaueren Kalkulation in das Modell direkt integriert werden.

7.4.2 Ergebnisdiskussion der Sensitivitätsanalyse

Der Lkw Transport von Hackschnitzeln macht einen erheblichen Anteil der Gesamtkosten in der Bereitstellungskette 1 aus. Mit Zunahme der Transportentfernung steigen auch die Kosten. Gegenüber anderen Bereichen (bspw. Transport von Industriegütern) gibt es in der Hackschnitzellogistik in der Regel keine Rückfrachten (SMALTSCHINSKI, 2010), so dass die Leerfahrten ebenfalls vollständig in die Kostenberechnung einfließen. Durch gekoppelte Bereitstellungsverfahren, wie bei der Zerkleinerung im Wald, können neben den reinen Fahrt- auch Kosten durch Wartezeiten entstehen. Diese beschränken sich nicht nur auf die, je nach Anzahl zeitgleich, eingesetzten Lkw, sondern auch auf den Hacker. Im Rahmen der Sensitivitätsanalyse wird dieser Einfluss auf die Durchschnittskosten nachvollziehbar abgebildet.

Die höheren Durchschnittskosten für die Bereitstellung von nicht vorgetrockneten Laubholz-hackschnitzeln im Vergleich zu trockenem Nadelholz ergeben sich durch die unterschiedliche spezifische Masse der Hackschnitzel und das damit einhergehende tatsächliche Transportvolumen. Hierbei muss berücksichtigt werden, dass dem Modell die gesetzlichen Grenzwerte zugrunde liegen (vgl. Kapitel 5.2.4). Da in der Praxis im Wald unter normalen Umständen keine Kontrolle des Gesamtgewichts möglich ist, besteht gerade bei waldfrischen Laubholz-hackschnitzeln eine größere Gefahr des Überladens (KUPTZ ET AL., 2015).

Im Rahmen der Sensitivitätsanalyse wird der Einfluss der Produktivität beim Bündeln auf die Durchschnittskosten bei der Bereitstellungskette 2 gezeigt. Unter Zugrundelegung der fiktiven Eingangsdaten muss die Leistung beim Bündeln auf mindestens 16 Stück je MAS steigen, um Kostenvorteile gegenüber Bereitstellungskette 1 zu erzielen. Dieser Wert wird in zahlreichen internationalen (PATTERSON ET AL., 2008; VESISENAHO ET AL., 2007 u. a.) sowie nationalen Studien (REUTHER, 2005; LECHNER, 2004) durchaus reproduzierbar erreicht (vgl. Kapitel 7.3.1). Auf Basis des in der vorliegenden Arbeit entwickelten Produktivitätsmodells wird eine derart hohe Produktivität ausschließlich im flachen Gelände und bei gleichzeitiger Anpassung des Zopfdurchmessers auf 12 Zentimeter erlangt (vgl. Abbildung 47).

Die Ergebnisse der Sensitivitätsanalyse machen deutlich, dass gerade bei kleineren Einsätzen das Gesamtvolumen des Waldrestholzes großen Einfluss auf die Durchschnittskosten ausübt. Dieses Phänomen ist aus Fachveröffentlichungen nicht bekannt, da Studien zur Untersuchung der gesamten Bereitstellungskette selten sind. Das Berechnungsmodell in der vorliegenden Arbeit berücksichtigt bei großen Einsätzen (im vorliegenden Fall >1.000 SRm) die erlaubten maximalen Lenkzeiten der Fahrer. Sollte jedoch der Einsatz unterbrochen

werden, um ihn am nächsten Tag fortzusetzen, können die sich daraus ergebenden zusätzlichen Rüstzeiten im Modell nicht abgebildet werden.

Die Zerkleinerung gilt bei der Herstellung von Hackschnitzeln als der energieintensivste Teil der Prozesskette (HÜTTL ET AL., 2015; BJÖRKLUND ET AL., 2011). Durch ungünstige Produktionsbedingungen im mobilen Einsatz kann sich die Energieeffizienz dieser Maschinen weiter verschlechtern. Der Bereitstellungkettenvergleich macht deutlich, dass bei der mobilen Zerkleinerung insgesamt höhere Kosten für Betriebsstoffe beibracht werden müssen als bei der Zerkleinerung im Werk. Dabei liegt der Kraftstoffverbrauch der Hacker deutlich über dem der übrigen Maschinen (vgl. WEISE ET AL., 2011). Der spezifische Kraftstoffverbrauch beträgt in diesem Fall circa 0,8 Liter je Schüttraummeter und befindet sich damit im oberen Bereich der in der Literatur genannten Werte (SPINELLI ET AL., 2012; BJÖRKLUND ET AL., 2011).

Die Sensitivitätsanalyse zeigt, dass die beiden Bereitstellungsketten unterschiedlich auf die Erhöhung der Kraftstoffkosten reagieren: Bei der Zerkleinerung am Werk steigen die Durchschnittskosten um 30 Prozent stärker an, als dies bei der anderen Variante der Fall ist. Hierzu tragen die insgesamt höheren Kosten für die Bereitstellungskette 2 bei. Die Preise für Dieselmotorkraftstoff müssten um circa 1,25 Euro steigen, damit der Anteil der Kosten für Betriebsstoffe an den Gesamtkosten für beide Alternativen identisch ist. Obwohl der Hacker recht deutlich als energieintensivster Teil der Prozesskette erkannt wurde, können die Ergebnisse nur eine Tendenz aufzeigen. Der Bereitstellungskettenvergleich kalkuliert mit einem festen Wert für den Kraftstoffverbrauch der Maschinen. Wechselnde Einsatzbedingungen (Geländebedingungen, verwendetes Rohmaterial, Maschinenführer etc.) können nicht berücksichtigt werden. In diversen anderen Studien wird vor allem die Leistungsklasse der Maschinen als Hauptursache für veränderten Kraftstoffverbrauch gesehen (HÜTTL ET AL., 2015; WEISE ET AL., 2011, CREMER, 2007). Durch Eingabe der spezifischen Maschinendaten in das Berechnungsmodell kann diesem Faktor somit Rechnung getragen werden.

8 Schlussfolgerungen

Aufgrund der Endlichkeit von Holz als Energieträger und Rohstoff sollten effiziente Arbeits-, Produktions- und Energieerzeugungsverfahren gewählt werden, die ein gutes Verhältnis zwischen eingesetzten Mitteln und daraus resultierenden Erfolg bieten (THRÄN ET AL., 2011). Dies betrifft bereits die Wahl der geeigneten Bereitstellungsverfahren. Dabei hat Holz auf Grund seiner physikalischen Eigenschaften Nachteile gegenüber den meisten fossilen Rohstoffen. Holz und insbesondere Waldrestholz hat eine relativ geringe Dichte (vgl. Kapitel 4.4) und besitzt im Verhältnis zum Volumen beziehungsweise zur Masse einen geringen monetären Wert. Zusätzlich sind die Waldrestholzvorkommen flächig über alle Waldgebiete verteilt. Das Verhältnis Transportkosten zum Warenwert ist im Vergleich zu anderen Gütern sehr hoch (KIENZLER ET AL., 2000).

Die Bereitstellungslogistik nimmt hier eine entscheidende Schlüsselposition für den wirtschaftlichen Erfolg der Restholznutzung ein. Die Ergebnisse der vorliegenden Arbeit machen deutlich, dass es grundsätzlich geeignete Arbeitsverfahren und technische Ansätze gibt, um eine professionelle und hochtechnisierte Bereitstellung von Waldrestholz zu gewährleisten. Bisherige Verfahrensansätze lassen sich in bestehende Arbeitssysteme einbinden. Es zeigt sich jedoch auch, dass ein großer technischer sowie organisatorischer Aufwand nötig ist, um das Holz in gewünschter Menge und Qualität bereitzustellen, was sich wiederum erheblich auf die Kosten der Holzernte auswirkt. Die Auswertung der Praxisbeispiele im Kapitel 6 zeigt, dass die Kosten der Bereitstellung von Waldrestholz die der Rundholzernte in der Regel übertreffen. Daher wird deutlich, dass Waldrestholz trotz der geringen Auszahlungspreise für den Waldbesitzer, aufgrund der aufwendigen Bereitstellungslogistik und in Abhängigkeit der Preise vergleichbarer Rundholzsortimente, keinesfalls ein günstiger Rohstoff ist.

Neben den Kosten einer Bereitstellungskette sind die Qualität und die dauerhafte, verlässliche Verfügbarkeit des Endprodukts ausschlaggebende Kriterien bei der Bereitstellung von Waldrestholz. Dabei unterscheiden sich die Ansprüche an die Logistik und das Endprodukt je nach Abnehmer erheblich. In der Praxis ist der Grad der stationären Aufbereitung und Weiterverarbeitung der Holzlieferungen sehr unterschiedlich. In der Holzwerkstoffindustrie finden sich hierzu in der Regel aufwendige Zerkleinerungs-, Sortierungs- und Trocknungsvorgänge, die es ermöglichen einen sehr inhomogenen Rohstoff einzukaufen. Entsprechend gering sind die Qualitätsanforderungen an das Rohholz, so dass weder Dimension noch Güte des Holzes Ausschlusskriterien für die Annahme der Lieferung sind. Bei vielen Holz(heiz)kraftwerken wird auf eine tiefgreifende Aufbereitung des Holzes verzichtet (vgl. Kapitel 2.2.5).

Bei der Bereitstellung von Waldrestholz kann auf die Qualität der Rohstoffe Einfluss genommen werden. Dies betrifft zum einen den richtigen Zeitpunkt von Ernte, Transport und Zerkleinerung des Holzes, als auch die Wahl und optimale Bedienung der eingesetzten Betriebsmittel. Darüber hinaus ist die Einbindung der Waldrestholzbereitstellung in die bestehenden Arbeitsverfahren der Stammholzernte notwendig und mitentscheidend bei der Einhaltung von Qualitätsstandards für das Waldrestholz. Allerdings sind der Einflussnahme der Bereitstellungssysteme auf die Qualität des Waldrestholzes auch Grenzen gesteckt, insbesondere dann, wenn das verwendete Rohholz aufgrund der Dimension, des Belaubungs- und Verwitterungszustandes sowie der Verschmutzung durch Erdanhaftungen nicht den Quali-

tätsanforderungen genügt. Ein Unterschied der betrachteten Bereitstellungsketten (vgl. Kapitel 2.3) hinsichtlich der Einhaltung von Hackschnitzelspezifikationen kann jedoch nicht nachgewiesen werden.

Durch die Verwendung von Waldrestholz im industriellen Maßstab entsteht ein großer Rohstoffbedarf. Das stellt besondere Anforderungen an die Logistik. Eine ‚Just-in-time-Produktion‘ der Hackschnitzel birgt ein gewisses Risiko, da die verzahnte Logistikkette störungsanfällig ist (WILDEMAN, 2001). Durch den Ausfall von einem Glied in der Kette, kommt es bei gekoppelten Verfahren zu einer erheblichen Kostensteigerung der Gesamtkette. Bei der mobilen Zerkleinerung sind die Arbeitsschritte Hacken und Transport unmittelbar aneinandergebunden. Wenn nicht genügend Transportkapazitäten zur Verfügung stehen, um das Hackmaterial abzufahren, entstehen ablaufbedingte Wartezeiten und damit unproduktive Zeiten des Hackers. Die Auslastung sinkt und der Einsatz wird kostenintensiver (SPINELLI ET AL., 2007; WITTKOPF, 2005; GUBA ET AL., 2004; ASIKAINEN, 2003; WENZELIDES, 2001; BECKER ET AL., 1974). Die Herausforderung besteht darin, durch optimale Organisation die gesamte Bereitstellungskette so zu gestalten, dass die ablaufbedingten Wartezeiten minimal sind. Oftmals sind aber auch örtliche Gegebenheiten (Sackgassen, schmale Wege) oder Witterungsverhältnisse Gründe für Unterbrechungen. Direktes Beladen der Transportfahrzeuge erfordert ein ausreichendes Platzangebot, welches aufgrund der örtlichen Gegebenheiten und der jeweiligen Erschließungssituation nicht immer gewährleistet werden kann. Die richtige Auswahl der Hackplätze und Poltergröße stellt daher die Weichen für eine organisatorisch und ökonomisch erfolgreiche Durchführung der Arbeiten (CREMER, 2008; SPINELLI ET AL., 2005).

Die vorliegende Arbeit verdeutlicht, dass eine schlechte Arbeitsvorbereitung (kleine, schlecht angelegte Polter, ungenügende Platzverhältnisse, lange Transportwege) häufig zu Lasten der Leistungsfähigkeit des Hackers gehen. Diese Ursachen können nicht vollständig bei der Vorkalkulation berücksichtigt werden, da sie schwer zu erfassen sind. Auch sind hier systembedingte Motive zu finden, da der Transporteur der Hackschnitzel unter Umständen eine andere Maxime hat als der Hackereigentümer. Dabei ist jeder an einer optimalen Auslastung seiner eigenen Maschine interessiert. Daher sind bei der geschlossenen Arbeitskette nicht alle Forderungen zu erfüllen und es kommt zu Interessenskonflikten. Dies macht auch WITTKOPF (2005) in seiner Modellkalkulation deutlich, wonach entweder die Lkw oder der Hacker optimal ausgelastet sind. Somit wird deutlich, dass erst die Betrachtung der gesamten Bereitstellungskette verlässlich Auskunft über den wirtschaftlichen Erfolg der Waldrestholzbereitstellung liefern kann. Manifestiert wird diese These durch den Vergleich der Bereitstellungsketten anhand von Praxisbeispielen in Kapitel 6. Am Beispiel 2 wird ersichtlich, dass eine Bereitstellungskette auch dann teurer sein kann, wenn ein oder sogar mehrere Arbeitsverfahren kostengünstiger sind als bei einer anderen.

Zur effizienten Durchführung der Transport- und Lagerprozesse besteht eine weitere Lösungsmöglichkeit darin, die Prozesse Zerkleinern und Transportieren zu trennen, wodurch die Maschinen unabhängig voneinander sind. Dies wird erreicht durch eine Zerkleinerung des Waldrestholzes am Ort der Verwendung (vgl. Kapitel 2.3.3). Neben den zu erwartenden Vorzügen im logistischen Ablauf finden sich bei der zentralen Zerkleinerung auch ökonomi-

sche Vorteile durch die Verwendung der stationären Maschinentechnik. Wie in Kapitel 5.3.6 verdeutlicht, lassen sich die Kosten gegenüber den mobilen Varianten erheblich senken. Hierbei fallen die geringeren Investitionskosten für stationäre Anlagen, durch den Verzicht auf ein Fahrwerk und ein Dieselaggregat weniger stark ins Gewicht als vielmehr die deutlich niedrigeren Betriebskosten durch den elektrischen Antrieb und die optimale Anlagenkonfiguration. Darüber hinaus sorgen die hohe jährliche Auslastung der stationären Anlagen sowie das automatisierte Handling für eine hohe Material- und Kosteneffizienz. Obwohl die stationären Bedingungen bei den Feldversuchen in dieser Arbeit (vgl. Kapitel 5.3.5) lediglich simuliert wurden, zeigt sich bereits ein deutlicher Vorzug im Vergleich zur mobilen Hackung. Dennoch fehlen hier die Ergebnisse weiterer Studien zur zentralen Holzaufbereitung, um verlässlich Leistung und Kosten bestimmen und vergleichen zu können.

Die Trennung von Zerkleinerung und Transport bei der Bereitstellung von Waldrestholz wird durch die Bündelung praktiziert. Anhand der Feldversuche wurde gezeigt, dass sich die Bündelverfahren unproblematisch in bestehende Bereitstellungsketten für Hackschnitzel integrieren lassen und sie sich generell auch für den Einsatz unter den besonderen waldbaulichen Bedingungen Mitteleuropas eignen (vgl. CREMER, 2007). Dies gilt allerdings nur, solange die Bündelung auf der Kahlfläche, an der Waldstraße oder im Altbestand erfolgt, da die technisch konstruktive Bauweise des Bündelaggregats sowie der Einsatz quer zur Fahrtrichtung, eine Mindesteinsatzbreite erfordert. Die Kosten für das zusätzliche Arbeitsverfahren der Waldrestholzbündelung können unter optimalen Verhältnissen durch geringere Kosten für das Rücken, den Straßentransport sowie das Zerkleinern des Energieholzes ausgeglichen werden (vgl. Kapitel 6).

Insgesamt ist der Einsatz der Bündlertechnologie in Mitteleuropa jedoch nicht als etabliertes Verfahren anzusehen. Es existieren nur wenige Einheiten in Deutschland (ca. 15-20 Maschinen; NOLTE, 2009). Er lohnt sich vor allem für Holzabnehmer, die große Lagerungsmöglichkeiten für die Bündel am Werk haben und mit großen Maschinen zur Zerkleinerung der Bündel ausgestattet sind (vgl. LISS, 2003). Bisher haben sich diese, insbesondere im energetischen Bereich, gleichwohl nicht auf die Annahme von Bündeln eingestellt und entsprechende Verarbeitungsvorrichtungen in ihren Werken vorgesehen. Dadurch ist der wirkliche Nutzen dieses Verfahrens bisher im größeren Maßstab in Deutschland nicht darstellbar. Die meisten Anlagen haben sich auf die Annahme von Holz in Form von Hackschnitzeln spezialisiert.

Dennoch haben einige Einsätze, auch im Rahmen dieser Untersuchung gezeigt, dass die Aufarbeitung zu Bündeln teilweise die einzige Möglichkeit der Nutzung des anfallenden Waldrestholzes darstellt. So konnte beispielsweise bei ganzflächigen Abtrieben, auf Grund der großen Menge des anfallenden Materials, keine andere Logistikform gewählt werden, da nur durch die Bündlertechnik das Material zeitlich entkoppelt geerntet, gelagert und bereitgestellt werden konnte, wobei die Platzverhältnisse keine andere Form der Lagerung zugelassen haben. Wenn aufgrund der Marktsituation keine Abnahme von Waldrestholz möglich und damit keine direkte Hackschnitzelverwendung gegeben ist und gleichzeitig das anfallende Holz nicht an dem Ort des Anfalls verbleiben kann, ist eine Bündelung ebenfalls oft unumgänglich. Gründe, die für einen sofortigen Abtransport des Materials sprechen, sind vor allem

Forstschutzaspekte, geringe Lagermöglichkeiten im Wald sowie weniger optimale Trocknungsmöglichkeiten.

Aus den im Rahmen des Projekts durchgeführten Versuchen mit Restholzbündlern können sich folgende Empfehlungen für künftige Einsätze dieser Technologie an vergleichbaren Einsatzorten ableiten lassen:

- eine auf die Arbeitsbedingungen des Bündlers zugeschnittene Vorbereitung und Einbindung in die Holzerntemaßnahme ist Grundvoraussetzung für einen erfolgreichen und produktiven Maschineneinsatz
- das Zusammenschieben des zu bündelnden Waldrestholzes durch Bagger oder Lader ist wegen der Gefahr der Einbringung von Fremdkörpern zu unterlassen
- grundsätzlich ist eine Verschmutzung der Holzreste sowohl vor als auch nach dem Bündelvorgang unbedingt zu vermeiden
- um den Bündeln die nötige Stabilität zu verleihen und den Prozess des Befüllens zu optimieren, sollte generell auf ausreichend lange Materialstücke geachtet werden. So sind beispielsweise Fichtenkronen nicht mehr weiter aufzuarbeiten und der Zopfdurchmesser im Optimalbereich auszuhalten
- jede unnötige Manipulation kann die Qualität der Bündel verschlechtern und soll vermieden werden.

Günstige Einkaufspreise für zerkleinertes Waldrestholz lassen sich vor allem durch Optimierungen bei der Logistik erzielen, wobei die Bereitstellungsverfahren lediglich ein Teilaspekt sind. Für eine verlässliche Bereitstellung von Waldrestholz an Abnehmer, die im industriellen Maßstab nahezu ausschließlich auf diesen Rohstoff zurückgreifen wollen, sind weitere Aspekte zu berücksichtigen. Hierzu wird in Kapitel 2.6 der Einsatz von Informations- und Kommunikationstechnologien vorgestellt. Hierdurch wird ein Datenaustausch innerhalb des Betriebes oder zwischen Partnern ermöglicht. Durch die Überwachung der Lager- und Umschlagsvorgänge lässt sich das Bedarfsdeckungsrisiko deutlich minimieren. Dabei bietet der industrielle Maßstab auch Vorteile und Chancen die Bereitstellung professioneller zu gestalten. Aufgrund der hohen Umschlagsmengen entsteht eine Routine bei den Arbeitsabläufen. Die Beaufsichtigung der Arbeiten wird vereinfacht und die Transaktionskosten sinken. Automatismen sorgen für eine rationelle Durchführung der Transport- und Lagerprozesse.

Es existieren nur wenige Modelle zur Abschätzung der Produktivität beim Hacken von Waldrestholz, was sicherlich auch auf die Komplexität der Einflussvariablen rückführbar ist. Vorhandene Modelle greifen meist zu kurz, rekurren auf eine geringe und teilweise unsichere Datengrundlage und weisen nicht unerhebliche Schwächen auf (BONT, 2005). Bei vorangegangenen Studien zur Bereitstellung von Waldrestholz durch Bündeln stand der Teilprozess der Bündelung und selten die gesamte Bereitstellungskette im Auge des Betrachters. Durch Einbindung von vor- und nachgelagerten Prozessen und deren Übergänge gelingt es ein realistischeres Bild bei der Abschätzung von Zeitbedarf und Kosten zu erzeugen.

Das vorliegende Modell für den Bereitstellungskettenvergleich kann helfen Leistung und Kosten bei der Bereitstellung von Waldrestholz zu schätzen (Vorkalkulationen). Die Besonderheit liegt darin, dass die gesamte Kette mit allen Teilprozessen betrachtet wird. Ausgangs- (Schlagabraum) und Endprodukt (verwendungsfähiger Holzschnitzel) sind bei den zu verglei-

chenden Verfahren identisch. Viele Eingangsdaten in das Modell werden aus den Ergebnissen dieser Arbeit berechnet oder ermöglichen eine individuelle Eingabe, nach den jeweiligen Verhältnissen im Einzelfall. Insbesondere bei den abhängigen Prozessen Hacken und Hackguttransport werden unproduktive und systembedingte Wartezeiten berücksichtigt, da diese erheblichen Einfluss auf die Gesamtkosten ausüben. Beispielsweise werden für die systembedingten Wartezeiten beim Hacken die tatsächlichen Kosten angesetzt, unter Berücksichtigung wechselnder jährlicher Einsatzdauer der Maschinen. In Kapitel 6.1.1 wird deutlich wie sich die Gesamtkosten für die Bereitstellungskette ‚Zerkleinerung im Wald‘ durch eine unterschiedliche Anzahl gleichzeitig eingesetzter Lkw verändern. Je nach Transportentfernung und unter Berücksichtigung von Fahrt- und Rangierzeiten kann der Einsatz eines weiteren Lkw die Reduzierung der Gesamtkosten zur Folge haben. Somit liefert das Modell wichtige Informationen, um Angebote für die Arbeiten zu erstellen und zu überprüfen. Dabei können auch qualitative Aspekte bei der Beurteilung der geeigneten Arbeitsverfahren einfließen. Durch die Möglichkeit, interaktiv die Kalkulationsgrundlagen wie beispielsweise Kosteneingangsgrößen für die Maschinenkosten, jährliche Laufleistungen oder Produktivitätswerte etc. beliebig zu verändern, kann die Berechnung der Bereitstellungskosten den jeweiligen Erfordernissen angepasst werden. Damit kann der Einfluss der Eingangsgrößen auf das Ergebnis abgeschätzt werden (Sensitivitätsanalyse). Die Verfahrensbeurteilung erfolgt einheitlich anhand der Kriterien Wirtschaftlichkeit, Verfügbarkeit von Maschinen und qualitativer Ansprüche an das Endprodukt.

Es bleibt festzuhalten, dass das Bündlerverfahren zwar die Bereitstellung von Waldrestholz in einer entkoppelten Kette erlaubt, aber sich in Mitteleuropa nicht durchgesetzt hat. Die Maschinenentwicklung ist im letzten Jahrzehnt nicht weiter vorangetrieben worden. Dennoch kann der in dieser Arbeit entwickelte Bereitstellungskettenvergleich hilfreich sein bei der Planung und Kalkulation der Arbeitsprozesse. Denn damit liegt eine detaillierte Datengrundlage vor, mit der es auch möglich ist, das etablierte Arbeitssystem der mobilen Zerkleinerung kritisch zu hinterfragen. Im Gegensatz zu bisherigen Ansätzen wird eine realistische Abbildung des Gesamtprozesses inklusive Warte- und Rangierzeiten abgebildet. Hierbei müssen durch weitere Forschungen die Leistungskennwerte und Kostenansätze überprüft beziehungsweise den jeweiligen spezifischen Bedingungen angepasst werden. So wurden beispielsweise Lücken bei der Leistungsabschätzung von Rückefahrzeugen entdeckt. Auf Grund fehlender Aufnahmedaten muss im vorliegenden Modell vielfach auf Mittelwerte zurückgegriffen werden. Zwar wurden statistische Zusammenhänge einzelner Einflussvariablen auf die Leistung beim Rücken nachgewiesen, jedoch reicht die Datengrundlage nicht aus, um verlässliche Berechnungen anstellen zu können. Ebenfalls unzureichend geklärt ist der Einfluss des Maschinenführers und unterschiedlicher Maschinenmodelle auf die Leistung.

Zusätzlich bietet das Modell eine Datenbasis, um eine Vorauskalkulation für die stationäre Zerkleinerung vorzunehmen. Diese wurde im Rahmen der Verwendung von Waldrestholz bisher weitestgehend außer Acht gelassen. Vor dem Hintergrund der technischen Entwicklung ist es nicht ausgeschlossen, dass sich zukünftig andere oder ergänzende Arbeitsverfahren neben dem Bündeln von Holz etablieren, die den Einsatz stationärer Anlagen ermöglichen. Erste Ansätze gibt es mit dem von der Firma Doll präsentierten Variante zum Transport von losem Schlagabraum (vgl.: ‚*Doll energy*‘; DOLL, 2014).

Da sich die vorliegende Arbeit mit den technischen und ökonomischen Rahmenbedingungen bei der Bereitstellung von Waldrestholz befasst, werden ökologische Aspekte nicht berücksichtigt. So ist fraglich, ob zukünftig überhaupt wesentliche Anteile an Waldrestholz in Deutschland genutzt oder der natürlichen Zersetzung im Bestand überlassen werden. Unter ökologischen und wachstumskundlichen Gesichtspunkten ist die Nutzung von Waldrestholz höchst umstritten, da dem Ökosystem dadurch Nährstoffe und Habitate entzogen werden (vgl. KÖLLING ET AL., 2017; FSC, 2013; UNSELD ET AL., 2010). In vielen anderen Nationen, insbesondere auch Ländern, in denen die Forst- und Holzwirtschaft einen größeren Anteil an der Bruttowertschöpfung haben, kann die Nutzung von Waldrestholz unabhängig von diesen Restriktionen erfolgen (FAO, 2017). Nicht zuletzt können die in dieser Arbeit erhobenen Daten auch genutzt werden, um eine verlässliche Planungsgrundlage bei der Bereitstellung von Holz aus der Landschaftspflege (bspw. aus dem Trassenfreischnitt an Straßen) zu erheben.

9 Zusammenfassung

Ziel der vorliegenden Untersuchung ist es, im Hinblick auf eine industrielle Nutzung von Waldrestholz, alternative Prozesse der Bereitstellung zu identifizieren und zu bewerten. Dabei werden die höheren Mengenströme bei einer industriellen Nutzung ebenso berücksichtigt, wie die qualitativen Ansprüche an den Rohstoff und die Einbindung der Waldrestholzlogistik in ein funktionierendes Abrechnungs- und Lagerhaltungssystem. Ausschlaggebend ist dabei die Beurteilung einer Bereitstellungskette in Gänze und nicht nur seiner einzelnen Prozesse. Hierfür wurden diverse Feldversuche durchgeführt, um Kenntnislücken bei wenig verbreiteten Bereitstellungsverfahren zu schließen oder um die Praxistauglichkeit zu überprüfen.

Da der Ort der Holzzerkleinerung einen wesentlichen Unterschied bei der Bereitstellung von Waldrestholz ausmacht, erfolgt die Aufteilung der Arbeitsverfahren im Rahmen der vorliegenden Arbeit nach einer ‚Zerkleinerung am Werk‘ und einer ‚Zerkleinerung im Wald‘. Für die Zerkleinerung im Werk muss das Waldrestholz nach der Ernte zum Ort der Verwendung transportiert werden. Die geringe Ladedichte des Restholzes hat diesen Arbeitsschritt in der Vergangenheit unrentabel darstellen lassen. Die einzige bisher im größeren Stil verwendete Alternative besteht darin, das Waldrestholz vor dem Transport zu komprimieren. Dies geschieht mit Hilfe sogenannter Restholzbündler, die den Schlagabraum auf der Fläche oder vom Polter an der Waldstraße aufsammeln und zu relativ homogenen Einheiten verarbeiten. Das dabei verdichtete Holz behält, durch Schnüre zusammengewickelt, auch nach der Lagerung seine Form und kann sowohl für den Vortransport im Wald, die Lagerung, als auch beim Straßentransport wie Kurzholz behandelt werden.

Durch Hiebsprotokolle von Windwurfflächen konnte der starke Einfluss sowohl des Volumenanfalls von Waldrestholz auf der Fläche, der Geländeneigung, als auch des Zopfdurchmesser bei der Stammholzernte auf die Produktivität beim Bündeln belegt werden. Auch die Vorbereitung des Waldrestholzes im Zuge der Stammholzernte beeinträchtigt die Leistung beim Bündeln. Mit Hilfe eines abgeleiteten Regressionsmodells, wo diese Abhängigkeiten integriert sind, lässt sich die Produktivität beim Bündeln auf Windwurfflächen zukünftig hoch signifikant vorhersagen. Bei Feldversuchen außerhalb von Windwurfflächen zeigt sich eine deutlich höhere Produktivität beim Bündeln, die mit durchschnittlich 18,5 Bündeln je Betriebsstunde, die Leistung auf Windwurfflächen um circa 100 Prozent übertrifft.

Für den Vortransport der Bündel im Wald sind alle gängigen Forwarder geeignet. Jedoch konnte den Spezialmaschinen mit einem drehbaren Rungenkorb im Rahmen von Leistungsaufschrieben eine höhere Produktivität bescheinigt werden. Ein Zusammenhang der Rückentfernung mit der Produktivität konnte signifikant nachgewiesen werden und es wurde deutlich, dass diese Korrelation stärker ist als beim Rücken von Kurzholz.

Der Straßentransport von Bündeln erfolgt durch Kurzholz-Lkw. Nur in Ausnahmefällen werden hierzu geschlossene Container verwendet, wenn die Qualität der Bündel einen Transport mit Rungenfahrzeugen nicht erlaubt. Der Bündeltransport unterscheidet sich in den meisten Punkten kaum bis gar nicht vom Kurzholztransport. Lediglich bei der Be- und Entladung sowie der Ladungssicherung können Unterschiede ausgemacht werden. Mit durchschnittlich

32 Minuten pro Ladevorgang im Rahmen von Ganztouren liegt eine erhebliche Zeiteinsparung gegenüber der Beladung mit Rundholz vor.

Die stationäre Zerkleinerung unterscheidet sich weitreichend von der mobilen Zerkleinerung. Zu den Unterschieden zählt die Einbindung der stationären Anlagen in den Stofftransport der Betriebe, die Verwendung von sparsamen und effizienten elektrischen Antrieben sowie die Dimension oder Funktionsweise der Technik. Hierzu zählt der Einsatz sogenannter *„Langsamläufer“*, die in der Literatur bisher wenig Beachtung finden. Hierbei befinden sich Zerkleinerungswerkzeuge an einer Welle, die sich gegen einen Kamm dreht oder an zwei Wellen, die sich gegeneinander bewegen. Die Wellen werden hydraulisch angetrieben und drehen sich langsam (30-100 Drehungen pro Minute). Dadurch wird eine stückige Zerkleinerung mit rauen und faserigen Kanten der Holzstücke erreicht. Im Feldversuch konnte den Wellenzerkleinerern eine hohe Produktivität und ein im Vergleich zu Schnellläufern geringerer Energieverbrauch bescheinigt werden. Durch den Einsatz von Elektroantrieben können gegenüber dem Dieselantrieb circa 60 Prozent Energiekosten eingespart werden. In der Holzindustrie erfolgt neben der Zerkleinerung häufig auch eine Siebklassierung und Trocknung der Rohstoffe. Im Feldversuch wurde eine Sternsiebanlage getestet, mit der in einem Arbeitsgang drei Fraktionen separiert werden können. Die grundsätzliche Eignung der Maschine konnte nachgewiesen werden und es zeigte sich, dass die Korngrößenverteilungen des zerkleinerten Holzes vor und nach der Siebung signifikant voneinander abweichen.

Bei der Zerkleinerung im Wald wird der lose Schlagabraum zunächst an die Waldstraße gerückt und in Poltern aufgesetzt. Dafür kommen gewöhnliche Tragrückeschlepper zum Einsatz, die unter Umständen durch den Anbau von zusätzlichen Rungen oder von Kompaktoren, wodurch das Holz während des Transports komprimiert wird, für den Transport optimiert werden. Anschließend erfolgt die Zerkleinerung in der Regel über mobile Hacker, welche das Hackgut direkt in die Behälter der Transportfahrzeuge füllen. Eine Zwischenlagerung der Hackschnitzel auf dem Waldboden ist oftmals nicht möglich, da die zur erneuten Aufnahme des Materials notwendige Ladetechnik nicht zur Verfügung steht und wegen der potentiellen Verunreinigung der Hackschnitzel mit Boden, Steinen und ähnlichem.

Durch Leistungsaufschriebe kann die Produktivität beim Rücken von Schlagabraum abgeschätzt werden. Die ermittelte durchschnittliche Leistung von 13,5 Schüttraummeter je Betriebsstunden bei den 30 beobachteten Hieben weicht um circa 30 Prozent nach unten von dem Mittelwert der Produktivität beim Rücken von Schlagabraum aus der Literatur ($N = 33$) ab. Nachweisbaren Einfluss auf die Produktivität haben hierbei die Flächengröße des Hiebs, der mittlere BHD des ausscheidenden Bestandes und die Rückeentfernung.

Die mobile Zerkleinerung mit Trommelhacker der oberen Leistungsklasse konnte im Feldversuch durch Stundenaufschriebe untersucht werden. An 22 Tagen wurden im Durchschnitt 44 Schüttraummeter je Betriebsstunde erzeugt. Der Wert liegt im unteren Bereich der Angaben aus der Literatur (47-78 SRm/BS).

Der Straßentransport von Hackschnitzeln kann durch landwirtschaftliche Schlepper oder Lkw erfolgen. Durch eine Zeitstudie werden ein landwirtschaftlicher Schlepper mit Abschiebe-, mit zwei Kippanhängern und ein Gliederzug Lkw mit Abrollcontainern miteinander verglichen. Der

Lkw zeigt deutliche Vorteile beim zulässigen Ladevolumen und der zulässigen Höchstgeschwindigkeit, was sich allerdings in den Zeitstudien nicht positiv auswirken konnte. Hierbei entsprach die Durchschnittsgeschwindigkeit des Lkw in etwa der des Schleppers mit zwei Anhängern. Dies ist jedoch der Tatsache geschuldet, dass die einfache Transportentfernung des Lkw bei den Aufnahmen lediglich 27 Kilometer betragen hat und keine Autobahnfahrt inkludierte. Das Ergebnis verdeutlicht, dass die tatsächliche Fahrtzeit stark von den Tourenbedingungen abhängig und daher nur schwer vorherzusagen ist. Je größer die einfache Transportentfernung ist, je exakter kann die tatsächliche Fahrtzeit durch ein Modell (bspw. BROKMEIER, 2013A o. FRIEDL ET AL., 2004) abgeschätzt werden. Auch hinsichtlich des Handlings und der Belademöglichkeiten unterscheiden sich die Transportvarianten erheblich. Die Verwendung eines Hakenliftgeräts macht den Lkw mit Abrollcontainer zu einem flexiblen Transportfahrzeug. Jedoch ist insbesondere bei Mitführung eines Anhängers mit zweitem Container und engen Platzverhältnissen auf der Waldstraße ein großer Platzbedarf für das Rangieren und Wechseln der Container vom Anhänger auf das Zugfahrzeug notwendig.

Ein wesentliches Kriterium für die Auswahl eines geeigneten Arbeitsverfahrens sind die Betriebs- und damit die Gesamtkosten sowie die Produktivität der einzelnen Teilprozesse. Hinsichtlich der Kalkulation von Zeitbedarfs- und Produktivitätswerten bedient sich diese Arbeit im Wesentlichen der Ergebnisse vorangegangener Kapitel. Um Wartezeiten bei gekoppelten Arbeitsverfahren angemessen berücksichtigen zu können, ist jedoch die Einbindung eines dynamischen Zeitbedarfsmodells notwendig. Zur Anwendung kommt eine vom Autor entwickelte Berechnung zur Abschätzung des Zeitbedarfs beim Hacken und Transportieren von Hackschnitzeln, welche auf ein Modell von WITTKOPF (2005) zur Abschätzung der optimalen Transportkapazität bei der mobilen Hackschnitzelherstellung aufbaut. Als Ergebnis können, im Rahmen eines Bereitstellungskettenvergleichs für nahezu jeden Praxiseinsatz, Kosten und Produktivität der Bereitstellung von Waldrestholz vorab kalkuliert werden. Anhand von drei Praxisbeispielen wird der Arbeitsverfahrensvergleich getestet und mit den Ergebnissen in der Praxis konfrontiert. Es zeigt sich eine gute Anwendbarkeit des Kalkulationsmodells. Durch eine Sensitivitätsanalyse werden unter Beibehaltung der sonstigen Eingangsgrößen (*ceteris paribus*) unterschiedliche Variablen des Modells getestet. Auf diese Weise kann der Einfluss unterschiedlicher Transportentfernungen, variierender Produktivität beim Bündeln sowie wechselnder Gesamtholzvolumina auf die Durchschnittskosten des Einsatzes verdeutlicht werden. Es zeigt sich, dass ein Arbeitsverfahren auch dann teurer sein kann, wenn ein oder sogar mehrere Teilprozesse kostengünstiger sind als bei einem anderen Bereitstellungsverfahren.

Trotz der nachgewiesenen Vorteile einer entkoppelten Bereitstellungskette hat sich zumindest der Bereich der Restholzbündelung in Deutschland nicht etablieren können. Auch der Versuch, losen Schlagabraum in Containern zu komprimieren und zu transportieren (Bsp.: *‘Doll energy’*; DOLL, 2014) und damit den Transport und die Zerkleinerung zu entzerren, scheint sich in Deutschland, auch aufgrund von Problemen bei der Straßenzulassung, nicht zu etablieren. Im Hinblick darauf, dass die industriellen Abnehmer von Waldrestholz durch den Einsatz effizienter Bereitstellungsverfahren besonders profitieren, könnten sie sich durch ihre Beteiligung an Forschung und Entwicklung einbringen, um den Fortschritt bei der Bereitstellung von Waldrestholz voranzutreiben.

10 Literaturverzeichnis

- AEE (2015):** Bundesländer – Übersicht zu Erneuerbaren Energien. <http://foederal-erneuerbar.de/uebersicht/bundeslaender>, zuletzt geprüft 31.10.2017.
- AFC (2015):** Erhebung statistischer Daten zu Preisen, Anbau und Verarbeitung nachwachsender Rohstoffe. Im Auftrag der Fachagentur Nachwachsende Rohstoffe e. V. AFC Consulting Group, Bonn.
- AFFENZELLER, G.; STEINMÜLLER, T. (2005):** Eine technische Metamorphose. Der Ponsse Buffalo Dual. Österreichische Forstzeitung (Arbeit im Wald) 116 (2) 1-3.
- AFFENZELLER, G.; STAMPFER, K. (2007):** Energieholzmehrmengen bei Seilnutzungen im Baumverfahren. Fallstudien in der Prinz Reuss'schen Forstverwaltung, Mautern sowie im Forstbetrieb Franz Mayr-Melnhof, Saurau. Institut für Forsttechnik, Department für Wald- und Bodenwissenschaften. Universität für Bodenkultur, Wien.
- AFL (2012):** AFL-Info 12/13. Richtlinien, Tarife, Kalkulation, Adressen. Arbeitsgemeinschaft forstwirtschaftlicher Lohnunternehmer Niedersachsen e.V., Göttingen.
- AGR (2012):** AGR bezweifelt amtliche Holzeinschlagsstatistik und hält Biomassepotential für überschätzt. Pressemitteilung der Arbeitsgemeinschaft der Rohholzverbraucher e.V. (AGR), 22.05.2012.
- AGR (2013):** Brennholz wird knapp und teuer. Pressemitteilung der Arbeitsgemeinschaft Rohholzverbraucher e.V. (AGR), 27.01.2013.
- AHONEN, A.; TERVO, M. (2000):** Turpeen hankintaverkoston käyttö energiapuun hankintaan. Loppuraportti 1997-1999. Oulun Yliopisto/Thule-instituutti. Seospoltaineiden tuotanto terminaalilla-hankekokonaisuus. VTT Energia. (in Finnisch mit englischer Zusammenfassung).
- ASIKAINEN, A. (2003):** Productivity, cost and availability factors of forest chip production. Bioenergy 2003. International Nordic Bioenergy Conference. Proceedings: 221-224.
- ALTEHELD, R. (2007):** Veränderte Stoffströme bei Sägeresthölzern – Auswirkungen auf den Holzmarkt. Vortrag beim Kongress „Rohholzmanagement in Deutschland“. Kongresszentrum Hannover, http://www.kompetenznetz-holz.de/aktuelles/rohholzmanagement/vortraege/11_Referat_Alteheld.pdf, zuletzt geprüft 25.07.2013.
- ALTEHELD (2008):** Mündliche Mitteilung des Leiters Holzeinkauf der Glunz AG im Rahmen der KWF-Tagung, Schmallingenberg.
- ANDERSSON, G.; NORDEN, B.; JIRJIS, R.; ASTRAND, C. (2000):** Composite residue logs cut wood-fuel costs. Skogforsk Results (1): 1-4.
- ANDERSSON, G.; ASIKAINEN, A.; BJÖRHEDEN, R.; HALL, P. W.; HUDSON, J. B.; JIRJIS, R.; MEAD, D. J.; NURMI, J.; WEETMAN, G. F. (2002):** Bioenergy from Sustainable Forestry: Production of Forest Energy, Kluwer Academic Publishers, Dordrecht (NL): 49-123.
- ARNOLD, D.; ISERMANN, H.; KUNH, A.; TEMPELMEIER, H.; FURMANS, K. (2008):** Handbuch Logistik. Springer Verlag, Heidelberg.
- ARNOLD, K.; RAMESOHL, S.; GRUBE, T.; MENZER, R.; PETERS, R. (2006):** Strategische Bewertung der Perspektiven synthetischer Kraftstoffe auf Basis fester Biomasse in NRW. Endbericht. Wuppertal Institut für Klima Umwelt Energie. Forschungszentrum Jülich GmbH.
- ARNOLD, K.; VON GEIBLER, J.; BIENGE, K.; STACHURA, C.; BORBONUS, S.; KRISTOF, K. (2009):** Kaskadennutzung von nachwachsenden Rohstoffen: Ein Konzept zur Verbesserung der Rohstoffeffizienz und Optimierung der Landnutzung. Wuppertal Papers Nr. 180.
- BACH, E.; PFEIFFER, P. (2004):** Leistungssteigerung von Verbrennungsmotoren. Lehrbrief V7 zu der Lehrveranstaltung Verbrennungsmotoren im Studiengang Fahrzeugtechnik. Lehrgebiet Kraftfahrzeugantriebe und Kolbenmaschinen. Fachbereich Maschinenbau / Verfahrenstechnik der Hochschule für Technik und Wirtschaft (Fh), Dresden.
- BALBACH, W. (2008):** Holzeinschlag mit neuem Rekord. Marktnews. Top Agrar Online. <http://www.topagrar.com/news/Markt-News-Holzeinschlag-mit-neuem-Rekord-79264.html>, zuletzt geprüft 22.08.2008.
- BARTELS, K. B. (2011):** Papierherstellung in Deutschland. Von der Gründung der ersten Papierfabriken in Berlin und Brandenburg bis heute. be.bra wissenschaft verlag, Berlin 2011.
- BAUA (2013):** Sicherheit und Gesundheit bei der Arbeit 2011. Bundesanstalt für Arbeitsschutz und Arbeitsmedizin. 1. Auflage. Dortmund. www.baua.de/suga, zuletzt geprüft 22.08.2013.

- BAUDISCH, C.; WITTKOPF, S. (2004):** Anteil erneuerbarer Energien soll gesteigert werden. Bayrische Landesanstalt für Wald- und Forstwirtschaft (LWF), Freising. LWF aktuell 48: 13-14.
- BAUMANN, T. (2008):** Analyse logistischer Prozesse und deren Optimierungspotentiale entlang der Holzbereitstellungskette vom Wald zum Werk unterstützt durch spezielle Verfahren der Prozessmodellierung. Dissertation, Albert-Ludwigs-Universität Freiburg Brsg.
- BDEW (2013):** BDEW-Strompreisanalyse Mai 2013. Haushalte und Industrie. Bundesverband der Energie- und Wasserwirtschaft e.V., Berlin.
[http://www.bdew.de/internet.nsf/id/123176ABDD9ECE5DC1257AA20040E368/\\$file/13%2005%2027%20BDEW_Strompreisanalyse_Mai%202013.pdf](http://www.bdew.de/internet.nsf/id/123176ABDD9ECE5DC1257AA20040E368/$file/13%2005%2027%20BDEW_Strompreisanalyse_Mai%202013.pdf), zuletzt geprüft 03.07.2013.
- BECKER, G.; PFEIL, C. (1974):** Ganzbaum-Waldhackschnitzel – Technische und wirtschaftliche Aspekte der Waldhackung. In Mitteilungen der Forstlichen Versuchs- und Forschungsanstalt Baden-Württemberg (62).
- BECKER, G.; BRUNSMEIER, M. (2013):** Konkurrenz zwischen stofflicher und energetischer Holznutzung – auch eine Frage der Allokation. Schweizerische Zeitschrift für Forstwesen: Vol. 164, No. 12: 382-388.
- BECKMANN, G. (2006):** Regionale Potenziale ausgewählter biogener Reststoffe. Informationen zur Raumentwicklung 1/2: 23-33.
- BEIMGRABEN, T. (2009):** Lagermöglichkeiten für Energieholz im Kontext verschiedener Qualitätsansprüche. Vortrag im Rahmen der „Brandenburger Energieholz-Tagung“, Bad Wildau.
- BEIMGRABEN, T. (2010):** Achtung Feuchte! Lagerung von Holzbiomasse für die energetische Nutzung. energieHolz (06): 6-8.
- BENZ, G.; ZUBER, M. (1997):** Die wichtigsten Forstinsekten der Schweiz und des angrenzenden Auslandes. Zweite überarbeitete und erweiterte Auflage. Vdf Hochschulverlag AG an der ETH Zürich.
- BERGRATH, J. (2010):** Report: Fahrerlöhne in Deutschland. Fernfahrer Heft 2/2010: 19-19.
- BINN, F.-J.; SCHMIDT, L. (2005):** Ermittlungen zur Wirtschaftlichkeit zweier Kraftwerke mit 12 und 16 t/h Dampfproduktion zur Erzeugung von Strom und Wärme unter besonderer Berücksichtigung des EEG und des KWKG. Unveröffentlichter Bericht. Auftraggeber: Bürener Land Energie GmbH, Bad Wünnenberg.
- BJÖRKLUND, Ö.; ELIASSON, L. (2011):** Effects of knife wear on the performance and fuel consumption for a drum chipper. In: Finnish Forest Research Institute (INFRES) (Hrsg.): FORMEC 2013 – 46. International Symposium on Forestry Mechanisation, 30. September – 02. Oktober 2013, Stralsund.
- BGR (2016):** Reserven, Ressourcen und Verfügbarkeit von Energierohstoffen. – Energiestudie 2016. Bundesanstalt für Geowissenschaften und Rohstoffe (BGR), Hannover.
- BMEL (2016):** Der Wald in Deutschland. Ausgewählte Ergebnisse der dritten Bundeswaldinventur. Bundesministerium für Ernährung und Landwirtschaft, Berlin.
- BMELV (2010):** Nationaler Biomasseaktionsplan für Deutschland. Beitrag der Biomasse für eine nachhaltige Energieversorgung. Bundesministerium für Ernährung, Landwirtschaft und Verbraucherschutz; Bundesministerium für Umwelt, Naturschutz und Reaktorsicherheit (BMU), Berlin.
- BMELV (2011):** Holzmarktbericht 2010. Abschlussbericht für die Forst- und Holzwirtschaft des Wirtschaftsjahres 2010 (1.1.2010-31.12.2010). Bundesministerium für Ernährung, Landwirtschaft und Verbraucherschutz, Bonn.
- BMU (2010):** Nationaler Biomasseaktionsplan für Deutschland. Beitrag der Biomasse für eine nachhaltige Energieversorgung. Bundesministerium für Umwelt, Naturschutz und Reaktorsicherheit (Hrsg.). Bundesministerium für Ernährung, Landwirtschaft und Verbraucherschutz (BMELV). Stand 9/2010.
- BMU (2011A):** Zeitreihen zur Entwicklung der erneuerbaren Energien in Deutschland. Bundesministerium für Umwelt, Naturschutz und Reaktorsicherheit (Hrsg.). Arbeitsgemeinschaft Energiebilanzen: Auswertungstabellen zur Energiebilanz der Bundesrepublik Deutschland. Stand 08/2011.
- BMU (2011B):** Erneuerbare Energien. Einstieg in die Zukunft. Bundesministerium für Umwelt, Naturschutz und Reaktorsicherheit (Hrsg.). 1. Auflage 11/2011.
- BMWİ (2010):** Energiekosten in Deutschland – Entwicklungen, Ursachen und internationaler Vergleich. Endbericht (Projekt 43/09). Frontier Economics Ltd und Energiewirtschaftliches Institut (EWI) der

- Universität Köln, im Auftrag des Bundesministeriums für Wirtschaft und Technologie (BMWi), London.
- BMWi (2013):** Strompreise für Industriekunden 2012 in Europa. Bundesministerium für Wirtschaft und Technologie (BMWi), Bundesnetzagentur, Bundesverband der Energie- und Wasserwirtschaft, Berlin.
- BMWi (2016):** Die Energie der Zukunft. Fünfter Monitoring-Bericht zur Energiewende. Berichtsjahr 2015. Bundesministerium für Wirtschaft und Technologie (BMWi), Bundesnetzagentur, Bundesverband der Energie- und Wasserwirtschaft, Berlin.
- BODELSCHWINGH, E. V. (2001):** Rundholztransport – Logistik. Diplomarbeit, Technische Universität, München.
- BODELSCHWINGH, E. V. (2004):** Weiterentwicklung der Trailertechnik. Das System VALMET Trailer. Vortrag auf dem 8. Forstlichen Unternehmertag, Freising.
- BODELSCHWINGH, E. V. (2005):** Analyse der Rundholzlogistik in der Deutschen Forst- und Holzwirtschaft. Ansätze für ein übergreifendes Supply Chain Management. Dissertation, Technische Universität München.
- BODELSCHWINGH, E. V. (2010):** Standardisierung von Informationsflüssen im Rundholzeinkauf. Vortrag im Rahmen des BME-Forums „Einkauf von Holz und Holzprodukten“, Frankfurt.
- BONT, L. (2005):** Kundenorientierte Optimierung der Sortiments-Aushaltung bei der Holzernte unter besonderer Berücksichtigung des Energieholz. Diplomarbeit an der Professur für forstliches Ingenieurwesen der ETH Zürich.
- BORCHERDING, M. (2007):** Rundholztransportlogistik in Deutschland: eine transaktionskosten-orientierte empirische Analyse. Dissertation, Universität Hamburg.
- BORTZ, J. (1999):** Statistik für Sozialwissenschaftler. 5., vollst. überarb. und aktualisierte Auflage, Springer-Verlag, Berlin, Heidelberg.
- BROKMEIER, H. (2007):** Hochmechanisierte Energieholzernte – Zur Produktivität von Fällersammleragregaten an Forstspezialmaschinen. ifa-Mitteilungen Reihe A, Heft 4 (Masterarbeit).
- BROKMEIER H. (2013A):** Zum Einsatz von CTI-Systemen beim Rohholztransport. Dissertation, Georg-August-Universität Göttingen. Cuvillier Verlag, Göttingen.
- BROKMEIER H. (2013B):** Holztransportzyklen (CTI-Systeme beim Rohholztransport, Teil 6) Forst & Technik, 25 (11): 26-29.
- BROKMEIER H. (2013C):** Ökonomische Bewertung von CTI-Systemen (CTI-Systeme beim Rohholztransport, Teil 7) Forst & Technik, 25 (12): 38-39.
- BRUNSMEIER M. (2014):** Nachhaltigkeitsbewertung der Bereitstellung von Wald- und Industrierestholz für alternative Energieholzprodukte zur thermischen Nutzung. Dissertation, Albert-Ludwigs-Universität Freiburg i. Brsg.
- BURGER F. J. (2010):** Bewirtschaftung und Ökobilanzierung von Kurzumtriebsplantagen. Dissertation, Technische Universität München.
- C.A.R.M.E.N. (2007):** Nachwachsende Rohstoffe – Wirtschaftsfaktor Biomasse. Jahrbuch 2006/2007. 2. Auflage. Centrales- Agrar- Rohstoff- Marketing- Energie-Netzwerk (C.A.R.M.E.N. e.V), Straubing.
- C.A.R.M.E.N. (2008):** Arbeitsgemeinschaft QM Holzheizwerke: Planungshandbuch. 2., leicht überarbeitete Auflage (Schriftenreihe QM Holzheizwerke, Band 4). Centrales- Agrar- Rohstoff- Marketing- Energie-Netzwerk (C.A.R.M.E.N. e.V), Straubing.
- CARUS, M.; PIOTROWSKI, S.; RASCHKA, A. ET AL. (2010):** Entwicklung von Förderinstrumenten für die stoffliche Nutzung von nachwachsenden Rohstoffen in Deutschland. Volumen, Struktur, Substitutionspotenziale, Konkurrenzsituation und Besonderheiten der stofflichen Nutzung sowie eine Entwicklung von Förderinstrumenten. Nova-Institut, Hürth.
- CREMER, T.; BECKER, G.; SAUTER, H. (2007):** Mobilisierung und wirtschaftliche Nutzung von Rohholz aus Wald und Landschaft zur Energieerzeugung. Abschlussbericht zu dem von der Deutschen Bundesstiftung Umwelt (DBU) geförderten Projekt; Aktenzeichen 22128-33/0.
- CREMER, T. (2008):** Bereitstellung von Holzhackschnitzeln durch die Forstwirtschaft – Produktivitätsmodelle als Entscheidungsgrundlage über Verfahren und Aushaltungsvarianten, entwickelt auf der Basis einer Metaanalyse. Dissertation. Albert-Ludwigs-Universität, Freiburg i. Brsg.
- CUCHET, E.; ROUX, P.; SPINELLI, R. (2003):** WP 9 – Bundler Tests: Bundling logging residue in temperate forests. Technical report FORENERGY Project, Cemagref TEMO, Montpellier.

- DB (2009):** Deutsche Bundesregierung. Antwort der Bundesregierung auf die Kleine Anfrage der FDP-Bundestagsfraktion. Deutscher Bundestag, 16. Wahlperiode. Drucksache 16/11834.
- DBFZ (2012):** Monitoring zur Wirkung des Erneuerbare-Energien-Gesetz (EEG) auf die Entwicklung der Stromerzeugung aus Biomasse. Endbericht zur EEG-Periode 2009 bis 2011. Im Auftrag des Bundesministeriums für Umwelt, Naturschutz und Reaktorsicherheit (BMU). Projektnummer DBFZ: 3330002 (FZK: 03MAP138). Deutsches Biomasse Forschungs Zentrum gGmbH, Leipzig.
- DBFZ (2015):** Biomassepotentiale von Rest- und Abfallstoffen – Status Quo in Deutschland. Deutsches Biomasse Forschungs Zentrum gGmbH, Leipzig.
- DE LABORDE, R. (1988):** Mobile wood chippers. Institute for Commercial Forestry Research (ICFR), Pietermaritzburg. Annual Report: 53-58.
- DENKINGER, B. (2005):** Wie forstliche Hacker arbeiten. LWF aktuell Nr. 48: 21-23.
- DESH (2012):** Die Branche. Deutsche Säge- und Holzindustrie Bundesverband e.V. (DeSH). <http://www.bshd.eu/sites/branche.php#holz>, zuletzt geprüft 24.05.2012.
- DESTATIS (2013A):** Preise. Preisindizes für die Land- und Forstwirtschaft. Fachserie 17 Reihe 1. Stand Dezember 2012. Statistisches Bundesamt, Wiesbaden. https://www.destatis.de/DE/Publikationen/Thematisch/Preise/Landwirtschaftspreise/ErzeugerpreiseLandForstwirtschaft2170100121124.pdf?__blob=publicationFile. Zuletzt geprüft 19.03.2013.
- DESTATIS (2013B):** Produzierendes Gewerbe: Produktion des Verarbeitenden Gewerbes sowie des Bergbaus und der Gewinnung von Steinen und Erden. Fachserie 4, Reihe 3.1. Quartal 4, 2012. Statistisches Bundesamt, Wiesbaden. https://www.destatis.de/DE/Publikationen/Thematisch/IndustrieVerarbeitendesGewerbe/Konjunkturdaten/ProduktionVj2040310123244.pdf?__blob=publicationFile. Zuletzt geprüft 19.03.2013.
- DESTATIS (2013c):** Inflationsrate in Deutschland von 1992 bis 2012. Veränderung des Verbraucherpreisindex gegenüber Vorjahr. Statistisches Bundesamt, Wiesbaden. <http://de.statista.com/statistik/daten/studie/1046/umfrage/inflationsrate-veraenderung-des-verbraucherpreisindexes-zum-vorjahr/>, zuletzt geprüft 27.06.2013.
- DESTATIS (2013d):** Preise. Daten zur Energiepreisentwicklung. Lange Reihen von Januar 2000 bis Mai 2013. Statistisches Bundesamt, Wiesbaden. https://www.destatis.de/DE/Publikationen/Thematisch/Preise/Energiepreise/EnergiepreisentwicklungPDF_5619001.pdf?__blob=publicationFile, zuletzt geprüft 03.07.2013.
- DESTATIS (2013E):** Wald und Holz. Gesamteinschlag nach Holzartengruppen. <https://www.destatis.de/DE/ZahlenFakten/Wirtschaftsbereiche/LandForstwirtschaftFischerei/WaldundHolz/Tabellen/GesamteinschlagHolzartengruppen.html>, zuletzt geprüft 31.07.2014.
- DESTATIS (2015):** Unterbeschäftigung, Überbeschäftigung und Wunscharbeitszeiten in Deutschland. Statistisches Bundesamt, Wiesbaden. https://www.destatis.de/DE/Publikationen/WirtschaftStatistik/2015/06/UnterbeschaeftigungUeberbeschaeftigung_062015.pdf?__blob=publicationFile, zuletzt geprüft 19.08.2016.
- DESTATIS (2017):** Land- und Forstwirtschaft, Fischerei. Forstwirtschaftliche Bodennutzung - Holzeinschlagsstatistik. Fachserie 3, Reihe 3.3.1. Erschienen am 11.04.2017 Artikelnummer: 2030331167004. Statistisches Bundesamt, Wiesbaden. https://www.destatis.de/DE/Publikationen/Thematisch/LandForstwirtschaft/WaldundHolz/Holzeinschlag2030331167004.pdf?__blob=publicationFile, zuletzt geprüft 31.10.2017.
- DESTATIS (2019):** Preise und Preisindizes für gewerbliche Produkte (Erzeugerpreise). Zeitreihe über die Veränderung der Preise für Dieselmotortreibstoff bei Abgabe an Großverbraucher (Lieferung von 50-70 hl frei Verbrauchsstelle). Fachserie 17 Reihe 2. Statistisches Bundesamt, Wiesbaden. https://www.destatis.de/DE/Publikationen/Thematisch/Preise/Erzeugerpreise/ErzeugerpreisePDF/Erzeugerpreise2170200131064.pdf?__blob=publicationFile, zuletzt geprüft 20.02.2019.
- DIETER, M. (2002):** Holzbilanzen 2000 und 2001 für die Bundesrepublik Deutschland. Hrsg.: Bundesforschungsanstalt für Forst- und Holzwirtschaft (BFH), Hamburg.
- DIETER, M.; ENGLERT, H. (2001):** Abschätzung des Rohholzpotentials für die energetische Nutzung in der Bundesrepublik Deutschland. Bundesforschungsanstalt für Forst- und Holzwirtschaft (BFH), Hamburg.
- DIETER, M.; ENGLERT, H. (2005):** Gegenüberstellung und forstpolitische Diskussion unterschiedlicher Holzeinschlagsschätzungen für die Bundesrepublik Deutschland. Arbeitsbericht 2005/2. Bundesforschungsanstalt für Forst- und Holzwirtschaft (BFH), Hamburg.

- DLG (2007):** DLG Testbericht. Kategorie Traktoren. Fendt 820 Vario TMS. www.dlg-test.de/pbdocs/traktoren/Fendt_820_Vario_TMS.pdf, zuletzt geprüft 29.07.2013.
- DOBERS, K. (2008):** Straßenbegleitholz als Energiequelle. Fraunhofer Institut für Materialfluss und Logistik (IML). Erneuerbare Energie 18 (1): 74-77.
- DÖRING, P.; GLASENAPP, S.; MANTAU, U. (2016):** Rohstoffmonitoring Holz: Energieholzverwendung in privaten Haushalten. Marktvolumen und verwendete Holzsortimente. Abschlussbericht. Informationssysteme für Rohstoffe (INFRO). Zentrum Holzwirtschaft, Universität Hamburg.
- DÖRING, P.; GLASENAPP, S.; MANTAU, U. (2017A):** Rohstoffmonitoring Holz: Holz- und Zellstoffindustrie 2015; Entwicklung der Produktionskapazität und Holzrohstoffnutzung; Zwischenbericht; Februar 2017. Universität Hamburg.
- DÖRING, P.; GLASENAPP, S.; MANTAU, U. (2017B):** Rohstoffmonitoring Holz: Holzwerkstoffindustrie 2015; Entwicklung der Produktionskapazität und Holzrohstoffnutzung; Abschlussbericht; März 2017. Universität Hamburg.
- DÖRR, H.; LANGE, M. (2013):** Monitoringbericht 2012. 3. Auflage. Bundesnetzagentur für Elektrizität, Gas, Telekommunikation, Post und Eisenbahnen sowie Bundeskartellamt, Arbeitsgruppe Energie-Monitoring (Hrsg.), Bonn.
- DREEKE, R. (2001):** Rundholzlogistik erfordert Informationstransparenz. Holz-Zentralblatt 127 (129): 1604.
- DREEKE, R. (2010):** Nach der Maschinenkostenkalkulation kommt nicht gleich der Gewinn – Besser kalkulieren! Forstmaschinen-Profi 01/2010: 18-19.
- DRESCHER, U. (2008):** Optimierungspotential des Organic Rankine Cycle für biomassebefeuerte und geothermische Wärmequellen. Dissertation, Universität Bayreuth.
- DROSSART, I.; MÜHLENHOFF, J. (2010):** Holzenergie. Bedeutung, Potenziale, Herausforderungen. Renewes Spezial. Ausgabe 43. Hrsg.: Agentur für Erneuerbare Energien e. V., Berlin.
- EBERHARDINGER, A.; WARKOTSCH, W.; ZORMAIER, F.; SCHARDT, M.; HUBER, T.; ZIMMER, B. (2009):** Prozessanalyse und Ökobilanzierung der Bereitstellung von Waldhackgut. Projektbericht in Auftrag der Fachagentur Nachwachsende Rohstoffe. Freising.
- EBERHARDINGER, A. (2007):** Auswertung der Ergebnisse der Hackerdatenbank der LWF Bayern in: Die Bereitstellung von Waldhackschnitzeln für Heiz(-kraft-)werke in Bayern The supply of wood chips for heating and cogeneration plants in Bavaria. 360° Legno - Le Radici di un Nuovo Futuro, Prato Cornico (ITA).
- EBERHARDINGER, A. (2011):** Innovative Verfahrenstechnik bei der Bereitstellung von Waldhackgut zur thermischen Verwertung. Dissertation, Technische Universität München, Freising.
- EBERT, H.-P.; BEIMGRABEN, T. (2005):** Heizen mit Holz in allen Ofenarten. Auflage 10. Ökobuchverlag, Staufen bei Freiburg.
- ECOPROG (2012):** Stromerzeugung aus Biomasse boomt – nur nicht in Deutschland. Pressemitteilung der ecoprolog GmbH vom 17.10.2012.
- EDLER, A.; MEISSNER, E.; REETZ, B.; SCHAUP P. (1998):** Trocknung von Biomasse mit hohem Grünanteil ohne Fremdenergie. Schriftenreihe der Energieforschungsgemeinschaft im Verband der E-Werke Österreichs. Institut für Wärmetechnik, Technische Universität Graz.
- EPF (2006):** Markt für Holzwerkstoffe wächst. Europäischer Holzwerkstoffverband (EPF). Parkett Magazin (4): 12-14.
- ERLER, J.; DÖG, M. (2009):** Funktiogramme für Holzernteverfahren – Komplex und trotzdem gut verständlich. FTI Forsttechnische Informationen 9+10. Kuratorium für Waldarbeit und Forsttechnik e. V. (KWF), Groß-Umstadt.
- EUWID (2012):** Marktbericht für Altholz Bd. 2006–2012. EUWID NEUE ENERGIE. Text-Nr.: 037 Ausgabe: NE45/2012. Europäischer Wirtschaftsdienst GmbH, Gernsbach.
- FAO (2017):** Draft Forest Products Market Statement. Food and Agriculture Organization. European Forestry Commission, Warsaw, Poland.
- FENZ, B.; STAMPFER, K. (2005):** Optimierung des Holztransports durch Einsatz von faltbaren Containern (LogRac). Endbericht zu einer Studie im Auftrag des Bundesministeriums für Land- und Forstwirtschaft, Umwelt- und Wasserwirtschaft und dem Land Steiermark. Universität für Bodenkultur Wien.
- FINDEISEN, E.; LINß, K. (2006):** Energieholzaushaltung aus der Durchforstung mittelalter Fichtenreinbestände unter Einsatz des Waldrestholzbindlers Pinox 330. Forst und Holz 61 (7) 274-279.

- FISCHER, H. (2001):** Optimierung der Rundholzanlieferung am Beispiel einer Zellstofffabrik. Diplomarbeit, Hochschule für Bodenkultur, Wien.
- FNR (2015):** Basisdaten Bioenergie 2015. 12. überarbeitete Auflage. Fachagentur Nachwachsende Rohstoffe e.V., Gülzow. [http:// https://mediathek.fnr.de/broschuren/bioenergie/basisdaten-bioenergie.html](http://https://mediathek.fnr.de/broschuren/bioenergie/basisdaten-bioenergie.html), zuletzt geprüft 04.11.2015.
- FORBRIG, A.; HAUCK, B. (2001):** Logistik als Geldquelle für Forst und Holz? Holz-Zentralblatt 127 (66): 872.
- FORBRIG, A., KLUGMANN, K.; NICK, L. (2004):** Kalkulationsgrundlagen der Arbeitsverfahren. AFZ-DerWald 59 (11): 582-583.
- FRANZ, M. (2009):** Biomassekraftwerke. Teil 4 Feuerungstechnik. Axpo Holz u. Energie AG, Zürich.
- FRICK, J.; GLATZ, M.; STURM, R. (2000):** Zeitstudie einer vollmechanisierten Durchforstung mit einem Universalharvester Menzi Muck A71 und Woody H50. Maturaprojekt aus Arbeitstechnik und Arbeitslehre. HBLF Forstschule Bruck / Mur.
- FRIEDL, K.; KANZIAN, CH.; STAMPFER, K. (2004):** Netzwerk Holz. Endbericht zu einer Studie im Auftrag des Kooperationsabkommens Forst-platte-Papier und der Holzindustrie Österreichs. Eigenverlag des Instituts für Forsttechnik, Department für Wald- und Bodenwissenschaften, Universität für Bodenkultur Wien.
- FRIES, E.-E. (2009):** Analyse von Rundholztransporten per Lkw mittels Echtzeitortung. Diplomarbeit, Technische Universität München.
- FRISCHE, W. (2013):** Persönliche Mitteilung; Mitarbeiter Spanplattenherstellung Egger, Brilon.
- FRÖBA, N.; HERRMANN, A.; WEISE, G. (2001):** „Lastesel“ meist besser als „Rennpferde“ – Transportleistung bei verschiedenen Höchstgeschwindigkeiten. Neue Landwirtschaft, Berlin. (1): 36-38.
- FRÖBA, N.; FUNK, M. (2005):** Dieselmotorenbedarf bei landwirtschaftlichen Arbeiten. 1. Auflage. Kuratorium für Technik und Bauwesen in der Landwirtschaft.
- FSC (2013):** Aus Prinzip Wald. Jahresbericht 2013. Forest Stewardship Council. FSC Deutschland.
- GABRIEL, O. (2009):** Wird der Pinox Bündler wieder produziert? Forst & Technik (7): 51.
- GATHER, M.; APFELSTÄDT, A. (2013):** I-LAN – Entwicklung und Erprobung produktivitäts- und effizienzsteigernder Lösungen zur intelligenten Vernetzung nationaler Ladungsverkehre. Projektbeschreibung des Forschungsvorhabens. Institut Verkehr und Raum der Fachhochschule Erfurt.
- GHAFFARIYAN, M. R.; ANDONOVSKI, V.; BROWN, M. (2011):** Application of a slash-bundler for collecting harvest residues in Eucalyptus plantations. Forest Science, No 1-2: 83-89.
- GENSING, D. (2008):** Hackschnitzel und Schredderware. Bringung, Lagerung, Transport und Zerkleinerung von Fichtenrestholz mit Verwertungsmöglichkeiten. VDM Verlage Dr. Müller, Saarbrücken.
- GEWECKE, M. (2004):** Bündelung von Ast- und Kronenmaterial – Eine Lösung zur effizienten Bioenergiebereitstellung in Mitteleuropa? Diplomarbeit, Albert-Ludwig-Universität Freiburg Brsg.
- GOLSER, M.; NEMESTÓTHY, K.; SCHNABEL, R. (2004):** Methoden zur Übernahme von Energieholz. Holzforschung Austria. Wien.
- GOLSER, M.; PICHLER, W.; HADER, F. (2005):** Energieholztrocknung. Endbericht (HFA-Nr.: F1887/04). Holzforschung Austria, Wien.
- GÖRNER, K. (1991):** Technische Verbrennungssysteme. Grundlagen, Modellbildung, Simulation. Springer Verlag, Berlin.
- GRAMMEL, R.; BECKER, G.; SERINI, G. (1980):** Abschlussbericht über die Projektstudie Bereitstellung von Rohholzhackschnitzeln durch die Forstwirtschaft zur Energiegewinnung. Heizholz CMA Projekt Nummer OE 11-003. Freiburg.
- GUBA, E., KUPRAT, H. (2004):** Prozesskette Bereitstellung von Energiewaldhackschnitzeln. Hacken von Laubstarkholzkronen und Laubschwachholz mit Spezialhacker; Qualitätsmanagement, vom Bestand bis ins Heizwerk. AFZ-DerWald 59 (12): 615-617.
- HÄBERLE, S. (1986):** Repräsentative Zeitbedarfsermittlung auf induktivem Wege – eine Utopie? Forstarchiv 57 (5): 192-197.
- HÄRTEL, S. (2009):** Bundeswaldinventur – Baumartenverteilung – Waldfläche nach Bundesländern. Ergebnisse der 2. Bundeswaldinventur. Stiftung Unternehmen Wald, Hamburg. <http://www.wald.de/bundeswaldinventur-der-wald-in-zahlen/>, zuletzt geprüft 18.11.2010.
- HAKKILA, P. (2004):** Developing technology for large-scale production of forest chips. Wood Energy Technology Programme 1999-2003. Final Report, TEKES National Technology Agency. Helsinki.

- HECKER, M. (2003):** Holztransport und Umweltschutz. AFZ-DerWald, 58 (4): 168-171.
- HEDDEN, H. (2009):** Regionalisierung der Aufkommens- und Verwendungspotenziale von Nadelstammholz in Deutschland. Dissertation, Universität Hamburg.
- HEIDE, H. C. VON DER; FRIEDEL, S.; BOMBOSCH, F. (2005):** Kalkulationsmodul auf Basis einer Harvesterleistungsanalyse. AFZ-DerWald 60 (18): 962-964.
- HEINRICH, B. (2011):** Mobile Hacker. Forst & Technik (3): 24-31.
- HEINRICH, B.; KRÄMER, G. (2013):** Kleines Einmaleins der Trocknungstechnik. Forstmaschinen Profi. 6 (21): 40-44.
- HELD, C.; GRULKE, M.; SEINTSCH, B. (2008):** Zur Wettbewerbsfähigkeit der Holzenergie: SWOT-Analyse und zukünftige Rahmenbedingungen der 1. Verarbeitungsstufe des bundesweiten Clusters Forst und Holz (Teil I). Holz-Zentralblatt, 134 (6): 145-147.
- HERRMANN, A.; PICKEL, P.; FRÖBA, N. (2000):** Transportgeschwindigkeit von Traktoren – Auswirkung unterschiedlicher bauartbedingter Höchstgeschwindigkeiten. Landtechnik 55 (5): 338-339.
- HILDEBRAND, R. (1979):** Die Schnittholztrocknung. 4. Ausgabe. Eigenverlag, Oberboihingen.
- HITTENBECK, J. (2009):** Entwicklung eines Grenzneigungsmodells für selbstfahrende Arbeitsmaschinen in der Forstwirtschaft. Dissertation. Georg-August-Universität Göttingen. Cuvillier Verlag, Göttingen.
- HOCHRAINER, F.; STAMPFER, E. (2006):** UE-Projekt Biomasse. Teilprojekt Produktion Logistik. Manuskript der ÖBf AG, Wien.
- HÖMBERG, K.; JODIN, D.; LEPPIN, M. (2004):** Methoden der Informations- und Datenerhebung. Technical Report 04002, in Modellierung großer Netze in der Logistik. Sonderforschungsbereich 559. Universität Dortmund.
- HOITSCH, H. J.; LINGNAU, V. (1999):** Kosten- und Erlösrechnung. Eine controllingorientierte Einführung. 3., neubearbeitete und erweiterte Auflage. Springer Verlag, Berlin.
- HOYNE, S.; THOMAS, A. (2001):** Forest residues: Harvesting, storage and fuel value. COFORD (National Council for Forest Research and Development). Department of Mechanical and Aeronautical Engineering, University of Limerick.
- HUBER, T.; KORTEN, S. (2008):** Logistik in der Forst- und Holzwirtschaft. Intelligente Software-Lösungen, moderne Datenübermittlung und innovative Transportsysteme bringen Bewegung in die Logistik. LWF aktuell (65) Logistik – Holz kommt in Fahrt: 3-5.
- HUBER, M. (2013):** Energieholz – Definition, Vermessung, Volumsermittlung und Umrechnung. Vortrag beim Seminar „Erfolgreiche Vermarktung und Bereitstellung von Energieholz“. Forstliche Ausbildungsstätte, Osslach.
- HÜSTER, F. (1997):** Leistungsberechnung für Baumaschinen. 3. Auflage. Werner Verlag, Düsseldorf.
- HÜTTL, K.; SCHULMEYER, F.; KUPTZ, D.; DIETZ, E.; ZORMAIER, F.; BORCHERT, H. (2015):** Prozessanalyse der Hackschnitzelbereitstellung. In: Optimale Bereitstellungsverfahren für Holzhackschnitzel. Berichte aus dem Technologie- und Förderzentrum im Kompetenzzentrum für Nachwachsende Rohstoffe (TFZ), Nr. 40.
- IEA (2008):** Key World Energy Statistics 2007. International Energy Agency, Paris.
<http://www.iea.org/statistics/>, zuletzt geprüft 19.04.2013.
- JACKE, H.; DREWES, D. (2004):** Zur Nutzungsdauer selbstfahrender Arbeitsmaschinen in der Forstwirtschaft. Forst und Holz 59 (12): 587-592.
- JACKE, H.; EBEL, A. (2006):** PrAllCon: Neues über Reifen im Forst – Teil 3: Zur Druckverteilung auf hartem Untergrund. Forst & Technik, 18 (3): 10-15.
- JACKE, H.; HITTENBECK, J. (2010):** Energetische Optimierungspotenziale unter Fahrwerken von Forstmaschinen (Teil 2). Forst und Holz, (2): 10-17.
- JACKE, H.; GESKE, H. (2013):** Alternative Kalkulation von Forst-Maschinenkosten. Holz-Zentralblatt 140 (49): 1215-1218.
- JACKE, H. (2007A):** Energie aus Waldholz – Teil 1: Bilanzen und Gehalte. Forst und Holz 62 (2): 12-18.
- JACKE, H. (2007B):** Energie aus Waldholz – Teil 5: Zerkleinerungstechnik. Forst und Holz 62 (10): 40-46.
- JACKE, H. (2007C):** Energie aus Waldholz – Teil 6: Spartanisches Spiel mit Spänen: professionelles Hacken. Forst und Holz 62 (11): 41- 47.

- JACKE, H. (2007D):** Kalkulation von Maschinenkosten. Manuskript zu der Lehrveranstaltung Holzernte-verfahren und Holztransport im WS 2007/08. Abteilung Arbeitswissenschaft und Verfahrenstechnologie (ifa) der Georg-August-Universität Göttingen.
- JACKE, H. (2013):** Bereitstellungsprozesse für Waldholz. Repetitorium zur Vorlesung im SS 2013. Abteilung für Arbeitswissenschaft und Verfahrenstechnologie (ifa) der Georg-August-Universität Göttingen.
- JIRJIS, R. (2003):** Storage of forest residue bales. Report No. 3. Department of Bioenergy, Swedish University of Agricultural Sciences, Uppsala.
- JOCHEM, D.; WEIMAR, H.; BÖSCH, M.; MANTAU, U.; DIETER, M. (2015):** Estimation of wood removals and felling in Germany: a calculation approach based on the amount of used roundwood. European Journal of Forest Research, Vol. 134 Issue 5: 869-888.
- JOOSTEN, R.; SCHULTE, A. (2003A):** Schätzung der Nährstoffexporte bei einer intensivierten Holznutzung in Buchenwäldern (*Fagus sylvatica* L.). Allgemeine Forst- und Jagd-Zeitung 174: 157-168.
- JOOSTEN, R.; SCHULTE, A. (2003B):** Schätzung der Reisigbiomasse und ihrer Nutzungspotentiale in Buchenbeständen (*Fagus sylvatica* L.) auf der Grundlage von Inventurdaten. Forstarchiv 74: 159-165.
- JÜNEMANN, R. (1989):** Materialfluss und Logistik – Systemtechnische Grundlagen mit Praxisbeispielen. Springer Verlag, Berlin.
- JUNG, H. (2006):** Allgemeine Betriebswirtschaftslehre. Oldenbourg Verlag, München.
- JUNGE, C. (2008):** Möglichkeiten und Grenzen der Vollbaumnutzung – Verwendung von Kronenholz der Baumart *Fagus sylvatica* zur Herstellung von dreischichtigen Spanplatten. Masterarbeit. Universität Göttingen.
- JYLHÄ, P.; LAITILA, J. (2007):** Energy wood and pulpwood harvesting from young stands using a prototype whole-tree bundler. *Silva Fennica* 41 (4): 763-779.
- KÄNDLER, G.; SCHMIDT, M.; BREIDENBACH, J. (2004):** Die wichtigsten Ergebnisse der zweiten Bundeswaldinventur. FVA-Einblick 4/2004.
- KÄRHÄ, K.; VARTIAMÄKI, T. (2004):** Productivity and Costs of Slash Bundling. Metsäteho Oy, NSR Conference on Forest Operations, Hyytiälä, Juupajoki, Finland: 79-86.
- KÄRHÄ, K.; VARTIAMÄKI, T. (2006):** Productivity and Costs of Slash Bundling in Nordic conditions. *Biomass and Bioenergy* 30 (12): 1043-1052.
- KAIL, C.; HABERBERGER, G. (1999):** Technik und Kosten der Kraft-Wärme-Kopplung bei GUD- und Dampfkraftwerken. VDI-Berichte (1495):95-111.
- KALLIO, M.; LEINONEN, A. (2005):** Production technology of forest chips in Finland. Technical Research Centre of Finland (VTT), Tampere.
- KALTSCHMITT, M., HARTMANN, H. (2001):** Energie aus Biomasse – Grundlagen, Techniken und Verfahren. Springer Verlag, Berlin.
- KALTSCHMITT, M. (2008):** Potenziale einer energetischen Nutzung von Biomasse in Deutschland. Deutsches BiomasseForschungsZentrum (DBFZ), Leipzig.
- KANZIAN, C. (2005):** Bereitstellung von Waldhackgut. Verfahren Energieholzgebündel im Gebirge. Unveröffentlichter Bericht des Instituts für Forsttechnik, Department für Wald- und Bodenwissenschaften an der Universität für Bodenkultur Wien.
- KANZIAN, C.; HOLZLEITNER, F.; KINDERMANN, G.; STAMPFER, K. (2006A):** Regionale Energieholzlogistik Mittelkärnten, Technical report, Insitut für Forsttechnik, Department für Wald- und Bodenwissenschaften, Universität für Bodenkultur.
- KANZIAN, C.; FENZ, B.; HOLZLEITNER, F.; STAMPFER, K. (2006B):** Waldhackguterzeugung aus Schlag-rücklass. FPP Bericht, Wien.
- KARE, E. (2008):** Übernahme der vollständigen Geschäftsanteile der Pinox OY durch Harvy Forester. Pressemitteilung der Pinox OY im Rahmen der KWF Tagung in Schmallenberg, 04.06.2008.
- KEIDAT, K. (2010):** Diversifikation im Transportgewerbe. GRIN Verlag, München.
- KEMPER, T. (2013):** Mündliche Mitteilung des geschäftsführenden Eigentümers des land- und forstwirtschaftlichen Lohnunternehmens Kemper, Brakel.
- KIENZLER, H.-P., SELZ, T.; MANNS, S. (2000):** Auswirkungen von erhöhten zulässigen Gesamtgewichten für den Rundholztransport. Untersuchung im Auftrag des Fachverbandes der Sägeindustrie Österreichs. Freiburg.

- KNEER, R. (2006):** Vorlesungsskript Feuerungstechnik, Lehrstuhl für Wärme- und Stoffübertragung, Rheinisch-Westfälische Technische Hochschule Aachen. Ausgabe WS 2006/2007, www.wsa.rwth-aachen.de, zuletzt geprüft 29.05.2012.
- KÖBERLE, M. (2007):** Vergleich verschiedener Aufarbeitungsvarianten für die Bereitstellung von Waldhackschnitzeln aus Kronenholz unter Berücksichtigung von Wirtschaftlichkeit und Hackschnitzelqualität. Diplomarbeit, Hochschule für Forstwirtschaft, Rottenburg.
- KÖHLER, S.; SAADAT, A. (2000):** Möglichkeiten und Perspektiven der geothermischen Stromerzeugung. Geothermische Technologieentwicklung – geologische und energietechnische Ansatzpunkte. Geothermie report 00-1. Scientific Technical Report STR00/23. GeoForschungsZentrum, Potsdam.
- KÖHLER, W.; SCHACHTEL, G.; VOLESKE, P. (2007):** Biostatistik. 4. Auflage. Springer Verlag, Berlin, Heidelberg.
- KÖLLING, C.; GÖTTLEIN, A.; ROTHE, A. (2017):** Energieholz nachhaltig nutzen. LWF aktuell 61, S. 32-36.
- KOHLER, S. (2013):** Energiewende in Deutschland – Roadmap bis 2020/2050. dena (Deutsche Energie Agentur). Vortrag im Rahmen der Umweltkonferenz Österreich, 09.03.2013, Salzburg.
- KORTEN, S.; HEINDL, U. (2009):** Optimierung des Rundholztransportes durch betriebsübergreifende Tourenplanung. Schlussbericht AiF-Projekt Nr. 15027. Lehrstuhl für Forstliche Arbeitswissenschaften und Angewandte Informatik, Technische Universität München.
- KOWALEWSKY, H.-H., (2011):** Schlepper, Unimog und Lkw im Vergleichstest. Biogas Journal (4): 44-50.
- KRAMER, H.; KRÜGER, H. H. (1981):** Vorrat und Nutzungsmöglichkeiten forstlicher Biomasse in der Bundesrepublik Deutschland. Der Forst- und Holzwirt, Hannover: 33-37.
- KRAUSE, K. (2010):** Möglichkeiten und Grenzen der Vollbaumnutzung – Verwendung von Kronen- und Stammholz der Baumart Eiche zur Herstellung von dreischichtigen Spanplatten. Masterarbeit. Universität Göttingen.
- KÜHMAIER, M.; KANZIAN, C.; HOLZLEITNER, F.; STAMPFER, K. (2007):** Wertschöpfungskette Waldhackgut. Optimierung von Ernte, Transport und Logistik. Projektstudie im Auftrag von BMLFUW, Land Niederösterreich, Stadt Wien und ÖBf AG. Universität für Bodenkultur, Department für Wald und Bodenwissenschaften, Institut für Forsttechnik, Wien.
- KUPTZ, D.; SCHULMEYER, F.; HÜTTL, K.; DIETZ, E.; TUROWSKI, P.; ZORMAIER, F.; BORCHERT, H.; HARTMANN, H. (2015):** Optimale Bereitstellungsverfahren für Hackschnitzel. Technologie- und Förderzentrum (TFZ) im Kompetenzzentrum für Nachwachsende Rohstoffe (Hrsg.), Straubing.
- KWF (2013):** Forstmaschinen vorausskalkulieren – Hintergründe, KWF-Richtwerte und Berechnungsbeispiele. 3. Auflage KWF-Merkblatt Nr. 17/2003.
- LAITILA, J.; ASIKAINEN, A.; HOTARI, S. (2005):** Residue recovery and site preparation in a single operation in regeneration areas. Biomass and Bioenergy 28 (2): 161-169.
- LANGE, M.; SONNTAG, H. (2009):** Zwischen Polter und Rampe. Optimierung der Holzlogistik mit der Dispositions- und Informationsplattform „Holz-Opera“. Forst und Holz 7/8: 14-18.
- LECHNER, H. (2004):** Quantifizierung der Auswirkungen einer Variation von Eingriffsstärke und Sortenbildung auf Massenfall und Kosten bei der Energieholzbereitstellung am Beispiel verschiedener waldbaulicher Ausgangssituationen. Abschlussbericht. Institut für Forstbenutzung und Forstliche Arbeitswissenschaften. Universität Freiburg.
- LECHNER, H. (2005):** Technische Gestaltung und wirtschaftliche Analyse alternativer Verfahren der Bereitstellung von Waldenergieholz. Abschlussbericht des Instituts für Forstbenutzung und forstliche Arbeitswissenschaft der Albert-Ludwigs-Universität Freiburg.
- LECHNER, H. (2011):** Massenfall und Nettoflächenerlöse bei der Energieholzbereitstellung – Auswirkungen einer Intensivierung der Eingriffsstärke und einer Modifikation der Sortimentsgestaltung auf Massenfall und Nettoflächenerlöse, untersucht auf der Grundlage von Fallstudien für verschiedene waldbauliche Ausgangssituationen. Dissertation, Albert-Ludwig-Universität, Freiburg Brsg.
- LECHNER, H.; BECKER, G. (2004):** Bündelung von Hiebsresten zur energetischen Verwertung. Eine Alternative zur Waldhackung? Präsentation auf der FORMEC, 37. Internationales Symposium „Mechanisierung der Waldarbeit“, Gmunden.
- LECHNER, H.; CREMER, T.; BECKER, G.; WILLEMS, S. (2007):** Hacken im Bestand oder an der Waldstraße? AFZ-DerWald 63 (6): 290-293.

- LEIBLE, L.; ARLT, A.; FÜRNIß, B.; KÄLBER, S.; KAPPLER, G.; LANGE, S.; NIEKE, E.; RÖSCH, CH.; WINTZER, D. (2003):** Energie aus biogenen Rest- und Abfallstoffen. Bereitstellung und energetische Nutzung organischer Rest- und Abfallstoffe sowie Nebenprodukte als Einkommensalternative für die Land- und Forstwirtschaft – Möglichkeiten, Chancen und Ziele. Wissenschaftliche Berichte FZKA 6882. Institut für Technikfolgenabschätzung und Systemanalyse, Forschungszentrum Karlsruhe.
- LEMM, R. (2009):** Betriebsübergreifende Planung und Steuerung von Holz-Lieferketten. Erfahrungen mit webbasierten Lösungen in kleinteiligen Strukturen. Tagungsband „Brandenburger Energieholz-Tagung“, Bad Wildau: 20-21.
- LISS, J., E. (2003):** Kostnadsjämförelse mellan buntsystem och traditionella flissystem vid uttag av skogsbränsle. Arbeitsdokument Nr. 4, Institutionen för Matematik, naturvetenskap och teknik, Högskolan Dalarna, Garpenberg.
- LÖBF (2000):** Landeswaldinventur Nordrhein-Westfalen (LWI). Landesanstalt für Ökologie, Bodenordnung und Forsten NRW (Löbf) und Landesforstverwaltung NRW (LFV) (Hrsg.), Düsseldorf.
- LÖFFLER, H. (1989):** Forstliche Verfahrenstechnik. Manuskript zu den Lehrveranstaltungen des Lehrstuhls für Forstliche Arbeitswissenschaft und Angewandte Informatik, Technische Universität München.
- LÖFFLER, H. (1992):** Forstliche Verfahrenstechnik (Holzernte). Dritte Auflage. Manuskript zu den Lehrveranstaltungen des Lehrstuhls für Forstliche Arbeitswissenschaft und Angewandte Informatik an der Universität München.
- LÖFFLER, G. (2007):** Hackgut – Übernahme & Lagerung. Salzburger Erneuerbare Energiegenossenschaft, Kurzinformation 1/2007.
- LUCERO, H. (2009):** Compactadora de Biomasa. Maquinas forestales, 5 (65).
<http://www.maquinasforestales.de/2009/01/compactadora-de-biomasa-descripcin.html>, zuletzt geprüft 31.07.2013.
- LÜCKGE, F.-J.; DISPAN, J.; HELD, C.; SEINTSCH, B. (2008):** Zur Wettbewerbsfähigkeit der Holzindustrie: SWOT-Analyse und zukünftige Rahmenbedingungen der 1. Verarbeitungsstufe des bundesweiten Clusters Forst und Holz (Teil II). Holz-Zentralblatt, 134 (10): 265-268.
- LÜTHY, C. (1997):** Holzrücken mit Forwarder. Wald und Holz (4): 33-35.
- LWK (2013):** Erfahrungssätze für überbetriebliche Maschinenarbeiten 2013. Fachausschuss für Betriebshilfe und Maschineneinsatz. Landwirtschaftskammer Nordrhein-Westfalen, Fachbereich Betriebswirtschaft, Bauen, Energie, Arbeitnehmerberatung; Rheinischer Landwirtschaftsverband e.V., Abteilung Betriebshilfe und Maschineneinsatz.
- MACK (2013):** Siebtechnik. Sternsiebe Typ S03 - S80. Ihre guten Sterne bei der Produktion. Mack GmbH. Produktinformation. http://www.macktec.de/p_dems.htm, zuletzt geprüft 06.11.2013.
- MAIER-WITT, D., WIPPERMANN, J. (2001):** Kombinierte Güterverkehre für den Holztransport. Holz-Zentralblatt 127 (78): 1028-1029.
- MANTAU, U. (2010A):** Entwicklung der stofflichen und energetischen Holzverwendung. Zentrum Holzwirtschaft, Universität Hamburg.
- MANTAU, U. (2010B):** Standorte der Holzwirtschaft, Holzrohstoffmonitoring, Holzwerkstoffindustrie – Kapazitätsentwicklung und Holzrohstoffnutzung im Jahr 2010. Zentrum Holzwirtschaft, Universität Hamburg.
- MANTAU, U. (2012A):** Holzrohstoffbilanz Deutschland. Entwicklungen und Szenarien des Holzaufkommens und der Holzverwendung von 1987 bis 2015. Zentrum Holzwirtschaft, Universität Hamburg.
- MANTAU, U. (2012B):** Energieholzverwendung in privaten Haushalten. Marktvolumen und verwendete Holzsortimente. Abschlussbericht. Informationssysteme für Rohstoffe (INFRO). Zentrum Holzwirtschaft, Universität Hamburg.
- MANTAU, U. (2018):** Holzrohstoffbilanzen und Stoffströme des Holzes – Entwicklungen in Deutschland 1987 bis 2016. Schlussbericht. Hamburg.
- MARUTZKY, R. (2000):** Holzeinsatz in Spanplatten. In: Taschenbuch der Spanplattentechnik. Deppe, H.-J.; Ernst, K. (Hrsg.). 4. Aufl. DRW-Verlag Weinbrenner, Leinfelden-Echterdingen.
- MAYBAUM, G.; MIETH, P.; OLTMANN, W.; VAHLAND, R. (2011):** Verfahrenstechnik und Baubetrieb im Grund- und Spezialtiefbau: Baugrund – Baugruben – Baugrundverbesserung – Pfahlgründungen – Grundwasserhaltung. Springer Verlag, Hamburg, Berlin.

- MAYR, F. (2009):** Handbuch der Kesselbetriebstechnik. Kraft- und Wärmeerzeugung in Praxis und Theorie. 11. vollständig überarbeitete und aktualisierte Auflage. Resch-Verlag, Gräfelfing.
- MC NEEL, J.F.; RUTHERFORD, D. (1994):** Modelling Harvester-Forwarder System Performance in a Selection Harvest, *Journal of Forest Engineering* 6 (1): 7-14.
- MERGLER, F.; SCHULMEYER, F.; ZORMAIER, F.; HÜTTL, K. (2012):** Bereitstellung von Waldhackschnitzeln. Bayrische Landesanstalt für Wald- und Forstwirtschaft (LWF), Freising. LWF-Merkblatt 10.
- MICHANICKL, A. (2007):** Entwicklung beim Holzeinsatz in der Holzwerkstoffindustrie. Vortrag beim Kongress „Rohholzmanagement in Deutschland“, Hannover.
- MICHANICKL, A. (2008):** Schnellwachsende Baumarten als Rohstoff in der Spanplattenherstellung. Vortrag bei der Veranstaltung „Kurzumtriebshölzer – Chancen und Perspektiven“. Landwirtschaftliches Technologiezentrum Augustenberg (LTZ).
- MONEGO, T.-M. (2010):** Einflussfaktoren auf den wirtschaftlichen Betrieb eines LKWs im Güterverkehr. Diplomarbeit Johannes-Kepler-Universität Linz. Diplomica Verlag, Hamburg.
- MÜHLENHOFF, J.; KAJIMURA, R.; BOENIGK, N.; WITT, J. (2017):** Holzenergie in Deutschland. Status Quo und Potenziale. *Renews Spezial* Nr 82. Agentur für Erneuerbare Energien e.V., Berlin.
- MÜLLER-LANGER, F.; SCHNEIDER, S.; WITT, J.; THRÄN, D. (2006):** Monitoring zur Wirkung der Biomasseverordnung. Zwischenbericht. (FKZ 204 41 133). Im Auftrag des Umweltbundesamts (UBA), Berlin.
- MÜLLER-LANGER, F.; WITT, J.; THRÄN, D.; SCHNEIDER, S. (2007):** Monitoring zur Wirkung der Biomasseverordnung. Abschlussbericht (FKZ 204 41 133). Im Auftrag des Bundesministeriums für Umwelt, Naturschutz und Reaktorsicherheit (BMU) und des Umweltbundesamtes (UBA). Institut für Genetik und Umwelt gGmbH, Leipzig.
- MUNLV (2007):** Restholz wird zu Strom. Ministerium für Umwelt und Naturschutz, Landwirtschaft und Verbraucherschutz des Landes Nordrhein-Westfalen (MUNLV). Landesamt für Natur, Umwelt und Verbraucherschutz Nordrhein-Westfalen (Hrsg.), Recklinghausen. *Natur in NRW* 4/2007: 12.
- MUNLV (2010):** Abschlussbericht der Landesregierung von Nordrhein-Westfalen zu den Folgen des Sturmereignisses „Kyrill“ vom 18./19. Januar 2007. Ministerium für Umwelt und Naturschutz, Landwirtschaft und Verbraucherschutz des Landes Nordrhein-Westfalen (MUNLV), Landesbetrieb Wald und Holz.
- NEFF, A.; NELLES, M.; KUPRAT, H.; GUBA, E.; HANSEN, L.; BRUNNER, J. (2006):** Erzeugung und Einsatz von, mittels Bündler und verschiedener Zerkleinerungstechnik erzeugter, Hackschnitzel. Hochschule für Angewandte Wissenschaft und Kunst. Fachhochschule Hildesheim/ Holzminde/ Göttingen. Fakultät Ressourcenmanagement in Göttingen. Endbericht 12/2006.
- NEFF, A. (2007):** Aufbereitung von Energiehackschnitzeln – unter besonderer Berücksichtigung der Qualitätsparameter. Dissertation. Georg-August-Universität, Göttingen.
- NEMESTÓTHY, N. (2008):** BFW Hackmaschinendatenbank. Online-Datenbank www.energieholz-zerkleinerung.at. Im Auftrag der Kooperationsplattform Forst Holz Papier (FHP). Bundesforschungs- und Ausbildungszentrum für Wald, Naturgefahren und Landschaft (BFW), zuletzt geprüft 22.08.2015.
- NEMESTÓTHY, N. (2012A):** Grundlagen für die Normung sowie Optimierung von Herstellung und Nutzung von Hackgut. BFW-Praxisinformation 28: 21-23.
- NEMESTÓTHY, N. (2012B):** Energieholzzerkleinerung – vom wertvollen Holzrohstoff zum Hackschnitzel oder zu Staub? BFW-Praxisinformation 28: 24-26.
- NIEDRINGHAUS, N. (2016):** Persönliches Gespräch mit Herrn Niklas Niedringhaus, Holzeinkauf bei der Fa. Egger Sägewerks GmbH, im Rahmen einer Betriebsbesichtigung am 08.07.2016.
- NIEMZ, P.; WAGENFÜHR, A. (2012):** Werkstoffe aus Holz. In: Taschenbuch der Holztechnik. Wagenführ, A.; Scholz, F. (Hrsg.). 2. aktualisierte Auflage. Fachbuchverlag Leipzig im Carl Hanser Verlag: 127-259.
- NITSCH, J.; KREWITT, W.; NAST, M.; VIEBAHN, P.; GÄRTNER, S.; PEHNT, M.; REINHARDT, G.; SCHMIDT, R.; UHLEIN, A.; BARTHEL, C.; FISCHEDICK, M.; MERTEN, F. (2004):** Ökologisch optimierter Ausbau der Nutzung erneuerbarer Energien in Deutschland. Forschungsvorhaben im Auftrag des Bundesministeriums für Umwelt, Naturschutz und Reaktorsicherheit. FKZ 901 41 803. Arbeitsgemeinschaft DLR/IFEU/WI. Stuttgart, Heidelberg, Wuppertal.
- NITSCH, J.; GERHARDT, N.; WENZEL, B. (2012):** Langfristszenarien und Strategien für den Ausbau der erneuerbaren Energien in Deutschland bei Berücksichtigung der Entwicklung in Europa und glo-

- bal. Schlussbericht BMU - FKZ 03MAP146. Deutsches Zentrum für Luft- und Raumfahrt (DLR), Stuttgart; Fraunhofer Institut für Windenergie und Energiesystemtechnik (IWES), Kassel. Ingenieurbüro für neue Energien (IFNE), Teltow.
- NOLTE, N.; REUTHER, C.; LECHNER, H. (2005):** Industrie- und Restholzernte mit dem Restholzbündler. *Forst & Technik* (5): 14-18.
- NOLTE, H. (2009):** Persönliches Gespräch mit Herrn Hubertus Nolte, Geschäftsführer der Pinox Deutschland GmbH, Vertriebspartner für Pinox Maschinen in Deutschland, Österreich und Schweiz, Bad Wünnenberg, am 08.01.2009.
- OESTEN, G.; ROEDER, A. (2012):** Management von Forstbetrieben. Band III. Leistungssystem, Zusammenfassung und Ausblick. Lehrbuch. Institut für Forstökonomie der Universität Freiburg.
- OCHS, T.; DUSCHL, C. u. SEINTSCH, B. (2007):** Struktur und Rohstoffbedarf der Holzwirtschaft: Teil I der Studie 'Regionalisierte Struktur- und Marktanalyse der 1. Verarbeitungsstufe der Holzwirtschaft'. *Holz-Zentralblatt*, 133 (10): 269-271.
- ÖKOINSTITUT (2004):** Stoffstromanalyse zur nachhaltigen energetischen Nutzung von Biomasse. Endbericht. Verbundprojekt gefördert vom BMU im Rahmen des ZIP, Projektträger FZ Jülich. Öko-Institut e.V., Freiburg.
- OTTO, K. (2012):** Kraftstoffsparender Traktoreneinsatz. Wie der Kraftstoffverbrauch in der Landwirtschaft verringert werden kann. Reihe Nachhaltigkeit, Band 45. Diplomica Verlag, Hamburg.
- PATTERSON, D. W.; PELKKI, M. H.; STEELE, P. H. (2008):** Productivity of the John Deere slash bundler in removing in-forest residues from pine harvest sites in the mid-south: four case studies. *Forest Products Journal* 58 (7/8): 31-36.
- PATZAK, W. (1984A):** Bereitstellung forstlicher Biomasse. Teil I. Bereitstellung forstlicher Biomasse aus Erstdurchforstung in Fichten- und Kiefernbeständen. Forschungsbericht BMFT-FB (C O 76). Bundesministerium für Forschung und Technologie. Ludwig-Maximilians-Universität, München.
- PATZAK, W. (1984B):** Bereitstellung forstlicher Biomasse mit mobilen Hackaggregaten mittlerer Leistung. *Holz-Zentralblatt* (122): 1815-1817.
- PAULITSCH, W. (1977):** Waldhackschnitzel für die Spanplattenherstellung. Eigenschaften von Spanplatten aus Buchen- und Eichenkronen-Waldhackschnitzeln. *Holz-Zentralblatt* 103 (15): 233.
- PAUSCH, R. (2002):** Ein System-Ansatz zur Untersuchung von Zusammenhängen zwischen Waldstruktur, Arbeitsvolumina und Kosten der technischen und biologischen Produktion in Forstrevieren ost- und nordbayrischer Mittelgebirge. Dissertation, Technische Universität München.
- PAUSCH, R.; PONITZ, K. (2002):** Harvesterleistung und Hiebsbedingungen. *Forst und Technik* (4): 10-14.
- PFOHL, H.-C. (2004):** Logistiksysteme: Betriebswirtschaftliche Grundlagen. 7. korrigierte und aktualisierte Auflage. Springer-Verlag, Berlin, Heidelberg, New York.
- PÖYRY (2007):** Unterstützung bei der Entwicklung von Rohstoffbereitstellungskonzepten für Biomasseheizkraftwerke in NRW. Unveröffentlichtes Manuskript im Auftrag der RWE Key Account Contracting GmbH. Jakko Pöyry Forest Industry Consulting, Freising.
- POLLEY, H.; BOLTE, A. (2010):** Dritte Bundeswaldinventur beginnt 2011. *AFZ-DerWald* 65 (17): 35-37.
- PROLIGNIS (2009):** Prolignis kooperiert mit Juwi. Gemeinsam sollen weitere Holz-HKW gebaut werden. Pressebericht. *Holz-Zentralblatt* 135 (12):1266f.
- PURFÜRST, F. T. (2009):** Der Einfluss des Menschen auf die Produktivität von Harvestersystemen. Dissertation, Technische Universität Dresden.
- RADDE, C.-A. (2006):** Ein Jahr Umsetzung der Abfallablagerungsverordnung / TA-Siedlungsabfall. Eine Bestandsaufnahme aus Bundessicht. *Müll und Abfall* 38 (6): 284-289.
- RAMESOHL, S.; ARNOLD, K. (2006):** Analyse und Bewertung der Nutzungsmöglichkeiten von Biomasse. Untersuchung im Auftrag von BGW und DVGW. Band 1: Gesamtergebnisse und Schlussfolgerungen. Wuppertal Institut für Klima Umwelt Energie, Wuppertal.
- RANTA, T. (2002):** Logging residues from regeneration fellings for biofuel production – a GIS-based availability and supply cost analysis. Dissertation Lappeenranta University of Technology, Finnland.
- RANTA, T.; RINNE, S. (2006):** The profitability of transporting uncomminution raw materials in Finland. *Biomass and Bioenergy* 30 (3): 231-237.
- RASCHKA, A.; CARUS, M. (2012):** Stoffliche Nutzung von Biomasse. Basisdaten für Deutschland, Europa und die Welt. Erster Teilbericht zum F+E-Projekt „Ökologische Innovationspolitik – mehr Ressourceneffizienz und Klimaschutz durch nachhaltige stoffliche Nutzung von Biomasse“ aus dem

- Umweltforschungsplan des Bundesministeriums für Umwelt, Naturschutz und Reaktorsicherheit, Förderkennzeichen 3710 93 109. Nova-Institut, Hürth.
- REFA (1998):** Arbeitsstudien, Arbeitsorganisation und Qualitätsmanagement in der Forstwirtschaft. REFA-Fachbuchreihe Arbeitsgestaltung, Stuttgart.
- REFA (2004):** Organisation in der Forstwirtschaft – mit REFA-Methoden zu effizienten Arbeitsprozessen. REFA-Fachbuchreihe Arbeitsgestaltung. REFA-Fachausschuss Forstwirtschaft (Hrsg.), 2. überarbeitete Auflage.
- REMLER, N. (1999):** Waldhackschnitzellogistik. Bayrische Landesanstalt für Wald- und Forstwirtschaft (LWF), Freising. LWF-Wissen 21: 58-61.
- RENZ, S. (2008):** Holzwerkstoff OSB: Herstellung, Eigenschaften, Anwendungen (Die Bibliothek der Technik (BT)) Taschenbuch. Verlag: SZ Scala GmbH.
- REUTHER, C. (2005):** Verfahrenstechnische und ökonomische Aspekte des Einsatzes des Restholzbündlersystems TJ 1490 D in Laubwäldern eines deutschen Mittelgebirges. Diplomarbeit, Albert-Ludwigs-Universität Freiburg.
- RÖDER, H. (2006):** Market Trends, Challenges and Opportunities for Wood-Based Panels. Jakko Pöyry Forest Industry Consulting. Vortrag „5th European Wood-Based Panel Symposium“. European Panel Federation (EPF), Hannover.
- RÖSER, D. (2009):** Effiziente Logistikketten als Strukturgeber für Bioenergieregionen – Das Konzept Nord-Karelien. Vortrag im Rahmen der „Brandenburger Energieholz-Tagung“, Bad Wildau.
- RÖSER, D.; SIKANEN, L.; ASIKAINEN, A.; PARIKKA, H.; VÄÄTÄINEN, K. (2011):** Productivity and cost of mechanized energy wood harvesting in Northern Scotland. Biomass and Bioenergy. 35 (11): 4570-4580.
- ROHRMOSER, C.; STAMPFER, K. (2003):** Optimierung der Bereitstellungskette von Waldhackgut. Abschlussbericht zum Projekt EWLOG-Umsetzung-Rohstoffforschung. AGRAR PLUS GmbH, St. Pölten. https://www.agrarplus.at/%2Fdownloads.html%3Ffile%3Dtl_files%2Fagrplus-inhalte%2Fdownloads%2Foptimierung_bereitstellungskette_waldhackgut.pdf, zuletzt geprüft 04.09.2012.
- RÜMLER, R. (1998):** Aufbereitung und Verwertung von Gebrauchtholz für die Holzwerkstoffindustrie. Vortrag „Mobil Oil Holzwerkstoffsymposium“, Stuttgart.
- RUMMER, B. D.; LEN D.; O'BRIEN, O. (2004):** Forest residues bundling project: new technology for residue removal. Forest Operations Res. Unit, Southern Res. Sta., Auburn, Alabama.
- RWE (2008):** Biomasse. Naturtalent mit Zukunft. www.rwe.com/rwe-innogy, zuletzt geprüft 21.12.2008.
- SACHS, L.; HEDDERICH, J. (2006):** Angewandte Statistik: Methodensammlung mit R. 12., vollständig neu bearbeitete Auflage. Springer Verlag, Berlin, Heidelberg.
- SAUTER, P.; WITT, J.; SCHEFTELOWITZ, M. (2012):** EEG-Monitoring zur Stromerzeugung auf Basis fester Biomasse. Vortrag bei der 18. Internationale Fachtagung Energetische Nutzung nachwachsender Rohstoffe, Freiberg.
- SCHAPER, C.; THEUVSEN, L. (2009):** Der Markt für Bioenergie. Agrarwirtschaft 58 (1): 91-102.
- SCHEFFKNECHT, G.; SCHUSTER, A.; STRUSCHKA, M. (2010):** Bioenergie. Ihr Beitrag zur nachhaltigen Energieversorgung. Themenheft Forschung No. 6. Erneuerbare Energien. Institut für Feuerungs- und Kraftwerkstechnik, Universität Stuttgart.
- SCHINK, B. (2013):** Bioenergie – Möglichkeiten und Grenzen. In: Tagungsband der 19. Fachtagung Energetische Nutzung nachwachsender Rohstoffe, Dresden. Hrsg.: Institut für Internationale Forst- und Holzwirtschaft, Technische Universität Dresden.
- SCHMITZ, K. W.; KOCH, G. (1995):** Kraft-Wärme-Kopplung. Anlagenauswahl - Dimensionierung - Wirtschaftlichkeit – Emissionsbilanz. VDI-Verlag, Düsseldorf.
- SCHNEEBERGER, W.; PEYERL, H. (2011):** Betriebswirtschaftslehre für Agrarökonomien. Facultas Verlag, Maudrich.
- SCHNEIDER, I.; ABERLE, K.; KÖLLNER, E. (1993):** Waldhackschnitzelgewinnung im Stadtwald Bräunlingen. Mitteilungen der Abteilung für Arbeitswissenschaft und Forstbenutzung der FVA Baden-Württemberg Nr. 12.
- SCHOLWIN, F.; THRAEN, D.; DANIEL, J.; SCHREIBER, K.; WITT, J.; SCHUHMACHER, B.; JAHRAUS, B.; KLINSKI, S.; VETTER, A.; BECK, J.; SCHEFTELOWITZ, M. (2008):** Anschlussvorhaben zum Monitoring zur Wirkung des novellierten Erneuerbare-Energien-Gesetzes (EEG) auf die Entwicklung der

- Stromerzeugung aus Biomasse. Institut für Energetik und Umwelt gGmbH, im Auftrag des Bundesumweltministerium für Umwelt, Naturschutz und Reaktorsicherheit (BMU), Leipzig.
- SCHOLWIN, F.; THRÄN, D.; WITT, J.; HENNIG, C.; RENSBERG, N.; SCHWENKER, A.; SCHEFTELOWITZ, M.; TROMMLER, M.; DANIEL-GROMKE, J.; SCHAUBACH, K.; GROPE, J. (2011):** Wirkungen des EEG auf die Stromerzeugung aus Biomasse. Tagungsband zu den Kasseler Abfall- und Bioenergieforum. Witzenhausen-Institut für Abfall, Umwelt und Energie GmbH, S. 16.
- SCHOLZ, V. (1993):** Energieproduktivität der deutschen Agrarwirtschaft. *Landtechnik* 48, S. 406-408.
- SCHUBERT, H. (1989):** Aufbereitung fester mineralischer Rohstoffe, Band I: Kennzeichnung von Körnerkollektiven, Kennzeichnung von Aufbereitungs- und Trennerfolg, Zerkleinerung, Klassierung. VEB Deutscher Verlag für Grundstoffindustrie, Leipzig: 65 ff.
- SCHULER, U.; CREMER, T.; BECKER, G. (2007):** Vorkonzentration von Hackmaterial mittels Langholz-LKW. *Forst und Holz* (12): 41-45.
- SCHULZ, W. (2005):** Die Entwicklung der Energiemärkte bis zum Jahr 2030. Energiewirtschaftliche Referenzprognose. Energiereport IV – Kurzfassung. Untersuchung im Auftrag des Bundesministeriums für Wirtschaft und Arbeit, Berlin. Energiewirtschaftliches Institut an der Universität zu Köln (EWI). Prognos AG, Basel.
- SCHUMACHER, H. (2007):** Mündliche Mitteilung des geschäftsführenden Eigentümers der Firma Hubert Schumacher, Landschaftspflege, Geseke.
- SCHUMANN, C.; FRIEDRICH, S.; ZORNMAIER, F. (2012):** Biomasseheiz(kraft)werke. Bayrische Landesanstalt für Wald- und Forstwirtschaft (LWF), Freising. LWF-Wissen 70: 59-63.
- SCHWEINLE, J. (2012):** Erzeugung von Energieholz aus Kurzumtriebsplantagen auf landwirtschaftlichen Marginalstandorten in Südwestdeutschland – Umweltbezogene und ökonomische Bewertung alternativer Bewirtschaftungskonzepte unter besonderer Berücksichtigung verschiedener Holzern-teverfahren. Dissertation Albert-Ludwigs-Universität Freiburg i. Brsg.
- SCHWERTFEGER, F. (1981):** Waldkrankheiten. 4. Auflage. Paul Parey Verlag, Hamburg, Berlin.
- SEEL, A. (2004):** Einführung in die qualitative Forschung. Pädagogische Akademie, Graz.
www.pze.at/typo3/fileadmin/user_upload/ife-dokumente/Qualitative_Forschung_Homepage.pdf, zuletzt geprüft 10.08.2013.
- SEINTSCH, B. (2007):** Die Darstellung der volkswirtschaftlichen Bedeutung des Clusters Forst und Holz – Ergebnisse und Tabellen für 2005. Bundesforschungsanstalt für Forst- und Holzwirtschaft (BFH), Hamburg.
- SEINTSCH, B. (2010):** Holzbilanzen 2006 bis 2009 für die Bundesrepublik Deutschland. vTI-Arbeitsbericht. Institut für Ökonomie der Forst- und Holzwirtschaft. Zentrum Holzwirtschaft, Hamburg.
- SEINTSCH, B. (2011):** Stellung der Holzrohstoffe in der Kostenstruktur des Holz- und Papiergewerbes in Deutschland. vTI-Arbeitsbericht. Institut für Ökonomie der Forst- und Holzwirtschaft. Zentrum Holzwirtschaft, Universität Hamburg.
- SIEGWART, H.; REINECKE, S.; SANDER, S. (2010):** Kennzahlen für die Unternehmensführung. Siebte, vollständig überarbeitete Auflage. Haupt Verlag, Bern.
- SITTERBERG, F. (2014):** Persönliches Gespräch mit Herrn Frank Sitterberg, Leiter Holzeinkauf Region westl. Niedersachsen, Nordrhein-Westfalen, Bentheimer-Holz GmbH, Bad Wünnenberg, am 07.01.2014.
- SMALTSCHINSKI, T. (2010):** Reduktion der Leerfahrten beim Rundholztransport. *Allgemeine Forst- und Jagd- Zeitung*, Nr. 181: 197–205.
- SOMMER, M.; BISPINCK, R.; ZACERT, U. (2010):** 60 Jahre Tarifautonomie – Rückblicke und Ausblicke. In BISPINCK, R.; SCHULTEN, T. (Hrsg.): *Zukunft der Tarifautonomie. 60 Jahre Tarifvertragsgesetz: Bilanz und Ausblick*. VSA-Verlag, Hamburg.
- SPINELLI, R.; HARTSOUGH, B. (2001):** A survey of Italian chipping operations. *Biomass & Bioenergy* 21: 433-444.
- SPINELLI, R.; HARTSOUGH, B.; MAGAGNOTTI, N. (2005):** Testing Mobile Chippers for Chip Size Distribution. *International Journal of Forest Engineering* 16: 29-35.
- SPINELLI, R.; NATI, C.; MAGAGNOTTI, N. (2007):** Recovering logging residue: experiences from the Italian Eastern Alps. *Croatian Journal of Forest Engineering* 28: 1-9.
- SPINELLI, R.; VISSER, R. (2008):** Analysing and estimating delays in harvester operations. *International Journal of Forest Engineering* 19 (1): S. 36–41.

- SPINELLI, R.; MAGAGNOTTI, N. (2012):** The effect of raw material, cut length and chip discharge on the performance of an industrial chipper. *Forest products journal*, Jg. 62, Nr. 7/8, S. 584-589.
- SPINELLI, R.; GLUSHKOV, S.; MARKOV, I. (2014):** Managing chipper knife wear to increase chip quality and reduce chipping cost. *Biomass & Bioenergy*, Jg. 62, Nr. 3: 117–122.
- STAMPFER, E.; STAMPFER, K.; TRZESNIEWSKI, A. (1997):** Bereitstellung von Waldhackgut. *Forschung im Verbund*, Schriftenreihe Band 29. Österreichische Elektrizitätswirtschafts-Aktiengesellschaft, Wien.
- STAMPFER, K.; STEINMÜLLER, T. (2004):** Leistungsdaten Valmet 911.1 X3 M. Endbericht. Departement für Wald- und Bodenwissenschaften. Universität für Bodenkultur Wien.
- STAMPFER, K.; KANZIAN, C. (2006):** Current state and development possibilities of wood chip supply chains in Austria. *Croatian Journal of Forest Engineering* 27 (2): 135-145.
- STERNER, V. (2004):** Leistungs- und Kostenanalyse einer Bündelmaschine für Reisig – Einsatz des Fiberpac 370B unter mitteleuropäischen Verhältnissen. Diplomarbeit. Albert-Ludwig-Universität Freiburg Brsg.
- STIEGLER, J. (2005):** Vergleichende Beurteilung aktueller Transportsysteme für Rundholz. Diplomarbeit, Universität Göttingen.
- STIEß, M. (1994):** Mechanische Verfahrenstechnik. Band 2. Springer Verlag Berlin, Heidelberg.
- STOCKINGER, H., OBERNBERGER, I. (1998):** Systemanalyse der Nahwärmeversorgung durch Biomasse. 1. Auflage. dbv-Verlag für die Technische Universität Graz.
- STRUNK, M. (2003):** Zum Einsatz von Wechselbrücken beim Rohholztransport in der deutschen Forst- und Holzwirtschaft. Bachelorarbeit. Institut für Forstliche Arbeitswissenschaft und Verfahrenstechnologie der Universität Göttingen.
- STRUNK, M. (2014):** Aspekte zur Bereitstellung von Rohholz für die energetische Verwertung – Ökonomische und ökologische Attribute zur Entscheidung zwischen aktuellen Arbeitssystemen und Prozessen. Dissertation. Georg-August-Universität, Göttingen.
- TEISCHINGER, A. (2012):** Holzvergütung – Trocknung. In: Taschenbuch der Holztechnik. WAGENFÜHR, A.; SCHOLZ, F. (Hrsg.). 2. aktualisierte Auflage. Fachbuchverlag Leipzig im Carl Hanser Verlag: 433-456.
- TERLECKI-BRUNNBAUER, M. (1997):** Trocknung von Hackschnitzeln mittels Abwärme. *Landtechnische Schriftenreihe* Nr. 208. Österreichisches Kuratorium für Landtechnik und Landentwicklung, Wien.
- THRÄN, D.; BILLIG, E. (2011):** Effizienz der Bioenergiegewinnung. *Bewertungsansätze, Beispielgrößen, Optimierungspotenziale*. DBFZ, Leipzig.
- TIMPERI, A. (2003):** Innovative wood fuel production system. *Bioenergy International* (5): 6-7.
- TIMPERI, A. (2004):** Sustainable Development Issues and Corporations – case Timberjack. Präsentation anlässlich der Veranstaltung: Towards sustainable Future – tools and strategies, Tampere.
- UHLIG, D. (1992):** Klassierprozesse in der Abfallaufbereitung. In *Materialrecycling durch Abfallaufbereitung*. Thomé-Kozmiensky, K.-J. (Hrsg.). EF-Verlag für Energie und Umwelttechnik GmbH, Berlin: 281-309.
- UN (2017):** World Population Prospects: The 2017 Revision, Volume I: Comprehensive Tables. United Nations, Department of Economic and Social Affairs, Population Division, New York. ST/ESA/SER.A/399. https://esa.un.org/unpd/wpp/Publications/Files/WPP2017_Volume-I_Comprehensive-Tables.pdf, zuletzt geprüft 31.10.2017.
- UNSELD, R.; WENZEL, M.; WEICH, T.; STARK, H.; BAUHAUS, J. (2010):** Energie-Vorwälder in Südwestdeutschland – Alternative Bewirtschaftungsformen zur Steigerung der energetisch nutzbaren Biomasse im Wald. *Forst und Holz* 65, Heft 10, 14-17.
- VAP (2009):** Vereinigung der Arbeitgeberverbände der Deutschen Papierindustrie e.V. *Papier + Technik*. Fachzeitschrift für Mitarbeiter der Papierindustrie. Ausgabe 2/2009. Dr. Curt Haefner Verlag, Leinfelden.
- VARNHOLT, H. (2013):** RWE setzt nicht länger auf kleine Biomassekraftwerke. Dow Jones News, Dow Jones & Company, Inc. <http://www.finanznachrichten.de/nachrichten-2013-02/26054793-rwe-setzt-nicht-laenger-auf-kleine-biomassekraftwerke-015.htm>, zuletzt geprüft 22.02.2013.
- VDP (2011):** Kennzahlen deutscher Zellstoff- und Papierfabriken. Verband Deutscher Papierfabriken e.V., Bonn.
- VER.DI (2011):** Regionale Tariflöhne für Berufskraftfahrer bzw. Lkw-Fahrer mit mehrjähriger Berufserfahrung. Ver.di Fachbereich 10 Postdienste, Speditionen und Logistik, Bundeszentrale Berlin.

- VESISENAHÖ, T.; VILKKILÄ, T.; BRUZGULIS, A. (2007):** Logging Residue Bundling Demonstration in Lithuania. Vilnius. Jyväskylä University of Applied Sciences (JUA), Bionovus. 5EURES (EIE/04/086/S07.38582). Project Report 31 – Demo-study.
- VHI (2012):** Holzwerkstoffproduktion in Deutschland. Verband der deutschen Holzwerkstoffindustrie. <http://www.vhi.de/template/index.cfm/>, zuletzt geprüft 19.03.2013.
- VOLKAMER, A.; ZORMAIER, F. (2009):** Trends und Neuigkeiten in Forsttechnik und Energieholzbereitstellung. Messerbericht zur Elmia Wood 2009. Bayrische Landesanstalt für Wald und Forstwirtschaft (LWF), Freising. LWF aktuell 73: 52-55.
- VORHOLT, H. (2010):** Preisindex für Holzprodukte zur Energieerzeugung. Ein neuer Indikator für den Energiemarkt. Statistisches Bundesamt. Wirtschaft und Statistik 3/2010, Wiesbaden.
- WEBER, J.; KRAUSENBOECK, B.; GÖLDNER, A. (1999):** Hackschnitzellagerung und Trocknungsverfahren. Bayrische Landesanstalt für Wald- und Forstwirtschaft (LWF), Freising. LWF-Wissen 21: 33-50.
- WEBER, J. (2013):** Gabler Wirtschaftslexikon, Stichwort: intervallfixe Kosten. Springer Gabler Verlag (Hrsg.), <http://wirtschaftslexikon.gabler.de/Archiv/4552/intervallfixe-kosten-v5.html>, zuletzt geprüft 16.07.2013.
- WEC (2013):** World Energy Issues Monitor 2013. World Energy Council, London. ISBN: 978 0 946121 20 5. <http://www.worldenergy.org/wp-content/uploads/2013/02/2013-World-Energy-Issues-Monitor-Report-Feb2013.pdf>, zuletzt geprüft 19.04.2013.
- WEIMAR, H.; DÖRING, P.; MANTAU, U. (2012):** Standorte der Holzwirtschaft – Holzrohstoffmonitoring. Einsatz von Holz in Biomasse-Großfeuerungsanlagen 2011. Abschlussbericht. Zentrum Holzwirtschaft, Arbeitsbereich Ökonomie der Holz- und Forstwirtschaft. Universität Hamburg.
- WEINGARTMANN, H. (1991):** Hackguttrocknung. Österreichisches Kuratorium für Landtechnik, Wien.
- WEISE, G.; ROSENBAACH, D.; SEELING, U. (2011):** Zum Kraftstoffverbrauch von Forstmaschinen. Forst & Technik, Jg. 23, Nr. 7, S. 34f.
- WEIXLER, H.; FELLER, S.; REMLER, N. (1999):** Ein neues Erntesystem für Waldhackschnitzel. Der Hackschnitzel-Harvester mit Shuttle. Holz-Zentralblatt 124 (83): 801ff.
- WENZELIDES, M. (2001):** Prozessketten für Waldhackschnitzel aus Schwachholzbeständen und Laubholzkronen – Betriebswirtschaftliche und verfahrenstechnische Analyse. Diplomarbeit, Fachhochschule Hildesheim/ Holzminden/ Göttingen.
- WENZELIDES, M.; HAGEMANN, H.; SCHULTE, A. (2006A):** Das neue Holzmaß ist ein Barrel-Äquivalent. Zukunftsrohstoff Dendromasse wird knapp und teuer. AFZ-DerWald 61 (22): 1202-1206.
- WENZELIDES, M.; HAGEMANN, H.; SCHULTE, A. (2006B):** Mobilisierbare Holzpotentiale geringer als erwartet. Holz-Zentralblatt. Sonderdruck.
- WENZELIDES, M.; HAGEMANN, H. (2007):** Bestimmung des nachhaltig mobilisierbaren Dendromassepotentials in Nordrhein-Westfalen anhand der Auswertung von Bundes- und Landeswaldinventur. Forstarchiv 78: 73-81.
- WILDEMAN, H. (2001):** Das Just-in-time-Konzept: Produktion und Zulieferung auf Abruf. TCW-Transfer-Centrum für Produktionslogistik und Technologie-Management, München.
- WINDISCH, J.; SIKANEN, L.; RÖSER, D.; GRITTEN, D. (2010):** Supply chain management applications for forest fuel procurement – cost or benefit? Silva Fennica 44 (5): 845–858.
- WISSEL, S.; RATH-NAGEL, S.; BLES, M.; FAHRL, U.; VOß, A. (2008):** Stromerzeugungskosten im Vergleich. Arbeitsbericht Nr. 4. Institut für Energiewirtschaft und Rationelle Energieanwendung. Universität Stuttgart.
- WITT, H. (2001):** Forschungsstrategien bei quantitativer und qualitativer Sozialforschung. Forum Qualitative Sozialforschung / Forum Qualitative Social Research, 2 (1), Art. 8. <http://www.qualitative-research.net/index.php/fqs/article/view/969/2115>. Zuletzt geprüft 10.08.2013.
- WITTKOPF, S.; KRICHBAUM, C.; BAUDISCH, C. (2003):** Energieholznutzung und Waldschutz im Einklang. Bayrische Landesanstalt für Wald- und Forstwirtschaft (LWF), Freising. LWF aktuell 39: 7-10.
- WITTKOPF, S. (2005):** Bereitstellung von Hackgut zur thermischen Verwertung durch Forstbetriebe in Bayern. Dissertation. Technische Universität München.
- WÖHE, G.; DÖRING, U. (2000):** Einführung in die allgemeine Betriebswirtschaftslehre. 20. Auflage, Verlag Franz Vahlen GmbH, München.
- WSL (2007):** HeProMo – Holzernteproduktivitätsmodelle. Version 1.01. Eidgenössische Forschungsanstalt für Wald, Schnee und Landschaft, Birmensdorf. CD

- YAZICI, B.; YOLACAN, S. (2007):** A comparison of various tests of normality. *Journal of Statistical Computation and Simulation* 77 (2): 175-183.
- Yu, C. (2005):** Sisal. In *Bast And Ohter Plant Fibres Band 39* von Woodhead Publishing series in textiles Woodhead Publishing Limited series on fibres. FRANCK, R.-R. (Hrsg.). Woodhead Verlag, Manchester.
- ZIESAK, M.; BRUCHNER, A.-K.; HEMM, M. (2004):** Simulation technique for modelling the production chain in forestry. *European Journal of Forest Research* 123 (3): 239-244.
- ZIMMERMANN, E.; WERN, B. (2004):** Machbarkeitsstudie und Wirtschaftlichkeitsbetrachtung verschiedener Trocknungsvarianten für Holzhackschnitzel in einem rheinland-pfälzischen Sägewerk unter Berücksichtigung der Steigerung des Energiegehalts der Hackschnitzel. Institut für angewandtes Stoffstrommanagement. Umwelt-Campus, Birkenfeld.
- ZMP (2007):** Deutschland führt beim Holzeinschlag in der EU. Aktuelle ZMP-Infografik. Zentrale Markt- und Preisberichtsstelle für Erzeugnisse der Land-, Forst- und Ernährungswirtschaft GmbH, Bonn. <http://www.zmp.de/marktgrafik/a/deutschland-fuehrt-beim-holzeinschlag>, zuletzt geprüft 02.04.2008.
- ZMP (2008):** Holzeinschlag in Deutschland. Zentrale Markt- und Preisberichtsstelle für Erzeugnisse der Land-, Forst- und Ernährungswirtschaft GmbH, Bonn. <http://www.zmp.de/marktstatistik/b/holzeinschlag-in-deutschland>, zuletzt geprüft 23.06.2008.

10.1 Gesetze und Verordnungen

- ARBZG (1994):** Arbeitszeitgesetz. Bundesrepublik Deutschland v. 06.06.1994 (BGBl. I S. 1170, 1171), zuletzt geändert durch Art. 3 Abs. 6 G v. 20.04.2013 (BGBl. I S. 868).
- BIOMASSEV (2012):** Verordnung über die Erzeugung von Strom aus Biomasse (Biomasseverordnung - BiomasseV). Bundesrepublik Deutschland v. 21.06.2001 (BGBl. I S. 1234), zuletzt geändert durch Art. 5 Abs 10 G v. 24.02.2012 (BGBl. I S. 212).
- BlmSchG (2013):** Bundes-Immissionsschutzgesetz. Bundesrepublik Deutschland v. 15.03.1974. (BGBl. I S. 1274), zuletzt geändert durch Art. 1 G v. 02.07.2013 (BGBl. I S. 1943).
- BlmSchV (2013):** Vierte Verordnung zur Durchführung des Bundes-Immissionsschutzgesetzes (Verordnung über genehmigungsbedürftige Anlagen – 4. BlmSchV). Bundesrepublik Deutschland v. 02. Mai 2013 (BGBl. I S. 973, 3756).
- BURLG (1963):** Mindesturlaubsgesetz für Arbeitnehmer (Bundesurlaubsgesetz). Bundesrepublik Deutschland v. 08.01.1963, zuletzt geändert durch Art. 3 Abs. 3 G v. 20.04.2013 (BGBl. I S. 868).
- CEN (2005):** Feste Biobrennstoffe – Probenahme. Teil 1: Verfahren zur Probenahme. Comité de Normalisation / Europäisches Komitee für Normung (CEN): CEN/TS 14778-1:2005, Berlin, Brüssel.
- EEG (2012):** Gesetz für den Vorrang Erneuerbarer Energien. Bundesrepublik Deutschland v. 29.03.2000 (BGBl. I S. 305), zuletzt geändert durch Art. 5 G v. 20.12.2012 (BGBl. I S. 2730, 2743 f.).
- StVO (2013):** Straßenverkehrs-Ordnung vom 06.03.2013. zuletzt geändert durch: Art. 1 V. zur Neufassung der Straßenverkehrs-Ordnung v. 01.04.2013 (BGBl. I S. 367).
- StVZO (2012):** Straßenverkehrs-Zulassungs-Ordnung vom 26. April 2012 (BGBl. I S. 679), zuletzt geändert durch Art. 1 V v. 26.07.2013 (BGBl. I S. 2803).
- VDI 3300:** Richtlinie. VDI-Fachbereich Technische Logistik: Materialfluss-Untersuchungen. VDI-Handbuch Technische Logistik - Band 7: Materialfluss I (Gestaltung). VDI-Gesellschaft Produktion und Logistik. ICS 03.100.10. 1973-08.
- VO (EG) 561/2006:** Verordnung des Europäischen Parlaments und des Rates vom 15. März 2006 zur Harmonisierung bestimmter Sozialvorschriften im Straßenverkehr und zur Änderung der Verordnungen (EWG) Nr. 3821/85 und (EG) Nr. 2135/98 des Rates sowie zur Aufhebung der Verordnung (EWG) Nr. 3820/85 des Rates (Text von Bedeutung für den EWR). Amtsblatt Nr. L 102 vom 11/04/2006: 1-14.

10.2 Produkt- und Herstellerinformationen

- DINGOMA (2013):** Dingo slash bundler. Produktinformation. <http://www.dingoma.es/images/ficheros/tddingoslashbundler.pdf>, zuletzt geprüft 23.07.2014.
- DOLL (2014):** DOLL energy – Restholztransport. Produktinformation. <http://www.doll-oppenau.com/produkte/holztransport-fahrzeuge/doll-energy/>, zuletzt geprüft 23.07.2014.
- DOPPSTADT (2012):** Doppstadt Vorzerkleinerer DW 4060 E. Produktinformation. www.doppstadt.de, zuletzt geprüft 30.05.2012.
- FIXTERI (2013):** Professional in harvesting technologies and logistics chain solutions. Produktbeschreibung. <http://www.fixteri.fi>, zuletzt geprüft 06.07.2013.
- FLIEGL (2012):** Quarzsand, Kisten, Kartoffeln, Pellets. Fliegl's Powerfloor Schubbodenaufleger. Produktinformation. www.fliegl-fahrzeugbau.de, zuletzt geprüft 31.05.2012.
- HAMMEL (2012):** Hammel Vorbrecher. Produktinformation. www.hammel.de, zuletzt geprüft 30.05.2012.
- HARVY (2013):** Manufacture of forest machinery. Harvy Forester. Produktinformation. <http://www.harvy-forester.ru/eng/index.html>, zuletzt geprüft 31.05.2013.
- HIAB (2013):** Hiab Multilift. Die Abrollkipperserie XR Power. Produktbroschüre. <http://www.hiab.de/default.asp?productGroupId=33622&productId=50382&docId=19771&tab=downloads>, zuletzt geprüft 28.07.2013.
- JENZ (2006):** Der perfekte Hacker in der Mittelklasse. Produktbeschreibung. www.jenz.de/uploads/txprodguidemaschine/HEM_560.pdf, zuletzt geprüft 23.08.2009.
- JENZ (2008):** Technik zur Aufbereitung von Biomasse. AKTUELL – Informationen für Kunden und Mitarbeiter. Ausgabe 25-2006, <http://www.jenz.de/infos/jenzaktuell/Jenz%2025-2006.pdf>, zuletzt geprüft 23.07.2013.
- JENZ (2012):** Jenz HEM 582 Z mit Förderband. Produktinformation. www.jenz.de Internet Abfrage 30.05.2012.
- KOMATSU (2005):** WoodPac wird für Europa angepasst. Just Forest. International Magazine. No 3: 4-5.
- KOMATSU (2012):** Komatsu Forest Produktübersicht. www.komatsuforest.de, zuletzt geprüft am 03.06.2012.
- KOMPTECH (2012):** Universalzerkleinerer für Grünschnitt und Holz. Produktinformation. www.komptech.de, zuletzt geprüft 30.05.2012.
- KRAMPE (2013):** Krampe Rollbandwagen Bandit. Produktinformation. www.krampe.de, zuletzt geprüft 31.05.2013.
- KÖGER (2013):** Kröger Agroliner Dreiseitenkipper. Produktinformation. www.kroeger-nutzfahrzeuge.de/21-0-HKD-302.html, zuletzt geprüft 31.05.2013.
- MONRA (2013):** ENFO 2000. Compactadora forestal. http://monraforestal.com/pdf/enfo2000_esp_ing.pdf, zuletzt geprüft 08.12.2013.
- NUHN (2013):** John Deere 1490D ECO III. Produktinformation. <http://www.nuhn.de/forstmaschinenmarkt/produkte/slash-bundler>, zuletzt geprüft 31.05.2013.
- PINOX (2008):** Neue Eigentümerstruktur bei der Pinox OY, Finnland. Kundenrundschreiben, Bad Wünnenberg. 28.05.2008.
- WELLINK (2013):** Dutch Dragon Press Collector. Die logistische Lösung für den Restholztransport. Produktinfo Wellink Caesar Timber Technology. <http://www.dutchdragon.nl/>, zuletzt geprüft 06.11.2013.

Anhang

Zerkleinerung im Wald

Tabelle 1.-1: Im Rahmen der Literaturstudie identifizierte professionelle Ablaufabschnitte im Bereich der Hackgutlinie.

Ablaufabschnitt	Untersuchte Systeme
Rücken	Tragschlepper ab 10 Tonnen Nutzlast
Hacken	Mobile Anhänge- oder Aufbauhacker >200 kW
Transport	Lkw-Transport mit großvolumigem Aufbau zum Transport von Schüttgütern; Fassungsvermögen >30 m ³

Tabelle 1.1-2: Teilprozess Rückung Schlagabraum - Übersicht über die verwendete Literatur zur Beurteilung der Rückeleistung.

Nr.	Titel	Autor	Jahr
1	Innovative Verfahrenstechnik bei der Bereitstellung von Waldhackgut zur thermischen Verwertung	EBERHARDINGER	2011
2	Vorkonzentration von Hackmaterial mittels Langholz-LKW	SCHULER ET AL.	2007
3	Vergleich verschiedener Aufarbeitungsvarianten für die Bereitstellung von Waldhackschnitzeln aus Kronenholz unter Berücksichtigung von Wirtschaftlichkeit und Hack-schnitzelqualität	KÖBERLE	2007
4	Waldhackguterzeugung aus Schlagrücklass	KANZIAN ET AL.	2006
5	Wertschöpfungskette Waldhackgut. Optimierung von Ernte, Transport und Logistik	KÜHMAIER ET AL.	2007
6	Bündelung von Ast- und Kronenmaterial. Eine Lösung zur effizienten Bioenergiebereitstellung in Mitteleuropa?	GEWECKE	2004
7	Leistungs- und Kostenanalyse einer Bündelmaschine für Reisig	STERNER	2004
8	Bereitstellung von Hackgut zur thermischen Verwertung durch Forstbetriebe in Bayern	WITTKOPF	2005

Tabelle 1.1-3: Teilprozess Rückung Schlagabraum – Eingesetztes Betriebsmittel Timberjack 1110D.

Technische Daten	Gewicht	15.500 kg
	Länge	9.570 mm
	Breite	2.890 mm
	Höhe	3.800 mm
	Anzahl Räder	6 Stück
Ladefläche	Ladekapazität	12 Tonnen
Antrieb	Perkins	Sechszylinder-Reihenmotor
	Nennleistung	129 kW
Kran	Timberjack CF 510	10 Meter Reichweite

Tabelle 1.1-4: Teilprozess Rückung Schlagabraum - Kostenkalkulation Forwarder.

A Eingangsdaten				P818
	Motorleistung [kW]			143
	Ladekapazität [Tonnen]			13
1.	Beschaffungspreis ohne USt. (Tsd. EUR)			240
2.	Veralterungszeit (Jahre)			10
3.	Normale Nutzungsdauer (MAS, gesamt)			17000
4.	Jährliche Einsatzdauer (MAS)			2000
5.	Reparaturkostenquote (echter Anteil)			1,0
6.	Kalkulat. Zinsfuß (%)			8
7.	Treibstoffverbrauch (l/MAS)			8,5
8.	Treibstoffkosten (EUR/l)			1,18
9.	Schmiermittelfaktor (echter Anteil)			0,2
10.	Restwert (Tsd. EUR)			24
11.	Mobilität (%)			1
12.	Sonstiges (% Besch.-Preis)			14
13.	Profit (%)			0
	Personal			
14.	Ausl.quote d. Maschine (echter Anteil)			0,8
15.	Personal (EUR/h)			14,50
16.	Personalnebenkosten (%)			60
B Kosten in EUR je Maschinenarbeitsstunde				
17.	Abschreibung			12,71
18.	Reparaturen			12,07
19.	Zins (kalkulatorisch)			5,28
20.	Betriebsstoffe			12,00
21.	Mobilität			1,20
22.	Sonstiges			16,80
23.	Profit			0,00
24.	Personal			29,00
C Gesamtkosten in EUR MAS				89,06

Tabelle 1.2-5: Teilprozess mobile Zerkleinerung – Eingesetztes Betriebsmittel Jenz Hacker HEM 560 Z.

Technische Daten	Gewicht	11.200 kg
	Länge	6.200 mm
	Breite	2.550 mm
	Höhe	3.800 mm
Zuführung	Kran	Epsilon M70
	Größe Materialdurchlass	680 x 1.200 mm
Rotor	Durchmesser	820 mm
	Anzahl Klingen	12 Stück (optional 24 St.)
Materialaustragung	Gebläse	Mech. Getriebe
Kontrollsystem	Displaysteuerung	Z-Tronic
	DIP-Funktion	Überlastautomatik
Kraftübertragung	Zapfwelle	100 kW – 350 kW

Tabelle: 1.3-6: Teilprozess Transport von Hackschnitzeln - Eingesetzte Betriebsmittel.

Bezeichnung	Landw. Schlepper 2 Kröger Kipper	Landw. Schlepper Abrollanhänger	Gliederzug Lkw Abrollcontainer	Sattelzug Lkw Schubbodenaufkl.
Zugfahrzeug	Fendt Vario 926	Fendt Vario 926	MB 2544	MB 1840
Anhänger	Kröger HKD302 Dreiseitenkipper	Krampe Bandit 980 Rollbandwagen	Abrollbehälter DIN 30722	Fliegl Walkingfloor
Eigengewicht	17,4 t	19,4 t	17,0 t	15,0 t
Nutzlast	22,6 t	20,6 t	23,0 t	25,0 t
Ladevolumen	38 m ³	52 m ³	80 m ³	90 m ³

Tabelle: 1.3-7: Teilprozess Transport von Hackschnitzeln - Kostenkalkulation Abrollcontainer Lkw.

A Eingangsdaten		Glieder- zug	Zugma- schine	An- hänger
	Motorleistung (PS)	440		
	Nutzlast (Tonnen)	20		
	Maximales theoretisches Ladevolumen (m³)	80		
	Füllungsgrad (%)	90		
	Maximales tats. Ladevolumen (m³)	72		
1.	Beschaffungspreis ohne USt. (Tsd. EUR)	141	113	28
2.	Veralterungszeit (Jahre)	k.A.	7	10
3.	Restwert (Tsd. EUR)	14	11	3
4.	Anzahl der Achsen (St.)	5	3	2
5.	Anzahl der Reifen (St.)	12	8	4
6.	Wiederbesch.-preis Reifen (Tsd. EUR)	5,5	3,5	2
7.	Wiederbesch.-preis o. Reifen inkl. Restw. (Tsd. EUR)	121,5	98,5	23
8.	davon leistungsfähig abzuschreiben (%)	k.A.	50	k.A.
9.	davon zeitabhängig abzuschreiben (%)	k.A.	50	100
10.	Reifenlaufleistung Achse 1 (Tsd. km)	k.A.	150	250
11.	Reifenlaufleistung Achse 2 (Tsd. km)	k.A.	180	250
12.	Reifenlaufleistung Achse 3 (Tsd. km)	k.A.	180	k.A.
13.	Treibstoffverbrauch Leerfahrt			
13.a	Unbefestigte Waldwege (l/100km)	65	60	
13.b	Befestigte Waldwege (l/100km)	27,5	25	
13.c	Öffentliche Straße (l/100km)	24,75	22,5	
14.	Treibstoffverbrauch Lastfahrt			
14.a	Unbefestigte Waldwege (l/100km)	115	90	
14.b	Befestigte Waldwege (l/100km)	47,5	37,5	
14.c	Öffentliche Straße (l/100km)	42,75	35	
15.	Treibstoffverbr. Be- und Entladen (l/h)	5		
16.	Treibstoffkosten (EUR/l)	1,18		
17.	Mautsatz (EUR/km)	0,16		
	Personal			
18.	Ausl.quote d. Maschine (echter Anteil)	0,9		
19.	Personal Jahresbruttolohn (Tsd. EUR)	28		
20.	Sozialaufwendungen (Tsd. EUR)	16,8		
21.	Spesen (Tsd. EUR)	4		
22.	Fahrerfaktor (echter Anteil)	1,2		
	Annahmen			
23.	Jahreseinsatzzeit (h)	2106		
24.	Jahreslaufleistung (Tsd. km)	100		
25.	Umlaufvermögen (Tsd. EUR)	20		
26.	Kalkulat. Zinsfuß (%)	8		

27.	Reparaturkostenquote (echter Anteil)	0,7		
28.	Schmiermittelfaktor (echter Anteil)	0,03		
29.	Leerfahrtenquote (echter Anteil)	0,5		
30.	Polteranfahrt Waldwege (km)	2,5		
31.	Holzabfuhr Waldwege (km)	1,5		
32.	Anteil unbefestigte Waldwege (echter Anteil)	0,3		
33.	Anteil befestigte Waldwege (echter Anteil)	0,7		
34.	Zeitverbrauch Ladevorgang gesamt (h/Tour)	2,27		
35.	Zeitverbrauch Entladevorgang gesamt (h/Tour)	0,33		
36.	Zeitverbrauch Ladevorgang (h/Tour)	1,37		

Zerkleinerung am Werk

Tabelle 2.1-8: Teilprozess Bündeln - Übersicht der verwendeten Veröffentlichungen.

Nr.	Titel	Autor	Land	Jahr	Umfang
1	Verfahrenstechnische und ökonomische Aspekte des Einsatzes des Restholzbündlersystems TJ 1490 D in Laubwäldern eines deutschen Mittelgebirges	REUTHER	DEU	2005	1.787 Bündel
2	Bündelung von Ast- und Kronenmaterial. Eine Lösung zur effizienten Bioenergiebereitstellung in Mitteleuropa?	GEWECKE	DEU	2004	662 Bündel
3	Productivity and Costs of Slash Bundling	KÄRHÄ ET AL.	FIN	2004	99.262 Bündel
4	Productivity of the John Deere slash bundler in removing in-forest residues from pine harvest sites in the mid-South	PATTERSON ET AL.	USA	2008	686 Bündel
5	Logging Residue Bundling Demonstration in Lithuania	VESISENAHO ET AL.	LTU	2007	592 Bündel
6	Bündelung von Hiebsresten zur energetischen Verwertung	LECHNER ET AL.	DEU	2004	1.700 Bündel
7	Bereitstellung von Waldhackgut: Verfahren Energieholzbündel im Gebirge	KANZIAN	AUT	2005	518 Bündel
8	Leistungs- und Kostenanalyse einer Bündelmaschine für Reisig	STERNER	DEU	2004	1.031 Bündel
9	Composite residue logs cut wood-fuel costs	ANDERSSON ET AL.	SWE	2000	k. A.
10	Performance of a logging residue bundler in temperate forest of France	CUCHET ET AL.	FRA	2003	1.662 Bündel
11	Forest Residues Bundling Project. New Technology for Residue Removal	RUMMER ET AL.	USA	2004	9.000 Bündel
12	Erzeugung und Einsatz von, mittels Bündler und verschiedener Zerkleinerungstechnik erzeugter, Hackschnitzel	NEFF ET AL.	DEU	2006	2.124 Bündel
13	Application of a Slash-Bundler for collecting harvest residues in Eucalyptus plantations	GHAFARIYAN ET AL.	AUS	2011	68 Bündel

Tabelle 2.1-9: Teilprozess Bündeln - Übersicht der wesentlichen Ergebnisse der Literaturrecherche (N = 116286 St. Bündel in 13 Studien).

		\bar{x}	Min.	Max.	\bar{x} (gew.)	Median
TAP	[St./MAS]	21,5	13	36	20,3	22
Masse	[kg(TS)/St.]	211	155	255	197	209
Kosten Bündeln	[EUR/St.]	6,85	4,00	11,15	4,30	5,86
Durchschnittskosten	[EUR/St.]	15,00	11,07	23,00	11,69	14,54
	[EUR/t (TS)]	59,58	47,31	73,60	51,74	59,25

Tabelle 2.1-10: Teilprozess Bündeln – Eingesetzte Betriebsmittel Kombimaschine Pinox 828.

Technische Daten	Gewicht	16.300 kg
	Länge	8.870 mm
	Breite	2.950 mm
	Höhe	3.850 mm
	Anzahl Räder	8 Stück
Ladefläche	Ladekapazität	12 Tonnen
	Größe Materialdurchlass	700 x 800 mm
	Bündellänge	Variabel einstellbar
Antrieb	Sisu Diesel 66 ETA	Sechszylinder-Reihenmotor
	Nennleistung	143 kW
Hydraulik	Kraftübertragung (210 L Min ⁻¹)	LINDE HPV 105
	Grundmaschine (270 L Min ⁻¹)	LINDE HPR 135
	Bündler (210 L Min ⁻¹)	LINDE HPV 105
Kran	PINOX 100 Paralcon	10 Meter Reichweite
Kontrollsystem	IQAN-Maschinensteuerung	SAKAE ("Mini") Hebel

Fragebogen Bündeleinsatz / hier Bündler (Pinox 828 / 330)

Flächeninformationen

Forstamt	<input type="text"/>		
Revier	<input type="text"/>		
Abteilung	<input type="text"/>		
Unterabteilung	<input type="text"/>		
Flächengröße / Bestandesalter	<input type="text"/>	ha	<input type="text"/> Jahre
Vorbehandlung / Zopf Ø	<input type="text"/>	(1 - 7)	<input type="text"/> cm o.R.
Vorrat	<input type="text"/>	Fm	
Efm gem. Holzverkauf	<input type="text"/>	Fm	
Geländeneigung	<input type="text"/>	%	

Maschineninformationen

Arbeitsanfang (Datum / MAS)	<input type="text"/>	tt.mm.2008	<input type="text"/> MAS
Arbeitsende (Datum / MAS)	<input type="text"/>	tt.mm.2008	<input type="text"/> MAS
Maschinenstunden	<input type="text"/>	MAS	
Gesamtstunden	<input type="text"/>	h	

Bündelinformationen

Anzahl / Bündellänge	<input type="text"/>	Stück	<input type="text"/> cm
Vorkonzentriert	<input type="text"/>	ja / nein	

-
- ¹ Harvester vorkonzentriert, Wipfel lang
 - ² Harvester vorkonzentriert, Wipfel kurz
 - ³ Harvester flächig, Wipfel lang
 - ⁴ Harvester flächig, Wipfel kurz
 - ⁵ Manuell Wipfel lang
 - ⁶ Manuell Wipfel kurz
 - ⁷ Manuell vorkonzentriert

Abbildung 2.1-1: Teilprozess Bündeln - Fragebogen Hiebsprotokoll.

Tabelle 2.1-11: Teilprozess Bündeln - Die durchschnittliche Leistung in den untersuchten Revieren.

	Tage [N]	TAP (\bar{x}) [St./BS]	Minimum [St./BS]	Maximum [St./BS]	S [St./BS]
Dahlbruch	4	12,8	9,0	15,0	2,9
Dautphetal	36	10,3	5,3	17,0	2,0
Eiserfeld	27	10,7	7,0	13,0	1,4
Esshoff	74	14,0	7,5	20,0	3,0
Freigrafenschaft	13	14,9	2,5	20,0	4,9
Glindfeld	6	9,1	5,4	11,7	2,8
Heinsberg	19	9,4	6,0	13,0	1,7
Kindelsberg	151	8,8	3,0	17,0	2,5
Küstelberg	10	11,4	7,6	15,9	2,7
Netphen	7	9,3	7,0	11,0	1,6
Saalhausen	3	10,5	10,0	11,0	0,7
Siegen 1	5	12,4	11,0	15,0	1,5
Siegen 2	10	10,1	8,0	12,0	1,2
Wiederstein	13	10,8	6,0	14,0	2,2

Tabelle 2.1-12: Teilprozess Bündeln - Versuchseinsätze außerhalb von Kyrillflächen.

Versuchseinsatz	Untersuchungsumfang (Σ)			TAP (\bar{x}) [St./BS]
	GAZ [h]	BS [h]	Bündel [St.]	
Biedenkopf	170	77	1.455	18,9
Borchen	20	18	187	10,4
Buschhütten	31	22	273	12,4
Lämmerweide	k. A.	31	630	20,3
Rinnthal	33	14	320	22,9
Winterberg	k. A.	58	1.206	20,8

Tabelle 2.1-13: Die Produktivität der untersuchten Maschinenführer anhand statistischer Kenngrößen. Zum Vergleich der Mittelwerte von jeweils zwei Fahrern erfolgte ein zweiseitiger t-Test (Signifikanzniveau: $\alpha = 0,05$).

	Tage [N]	TAP (\bar{x}) [St./BS]	Minimum [St./BS]	Maximum [St./BS]	S [St./BS]
Fahrer 1	135	13,1	5,3	43	4,78
Fahrer 2	112	9,4	2,5	14,7	2,37
Fahrer 3	108	9,6	5	16,9	2,22
Fahrer 4	29	10,4	2,5	20	4,02
		t-Wert	FG	P	
Fahrer 2 vs. Fahrer 3		-0,638	212	0,524	
Fahrer 1 vs. Fahrer 2		7,852	188	< 0,001	

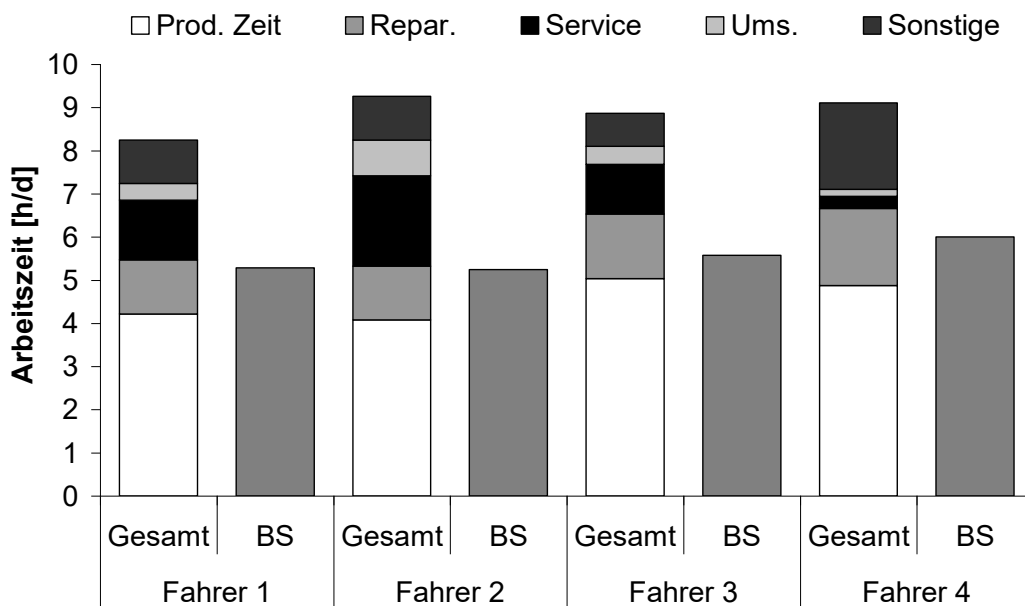


Abbildung 2.1-2: Die durchschnittliche Verteilung der Gesamtarbeitszeit auf die einzelnen Tätigkeiten bei Fahrer 1 bis Fahrer 4 während eines Arbeitstages und die durchschnittlichen Betriebsstunden eines Tages.

Tabelle 2.1-15: Teilprozess Bündeln - Lineares Regressionsmodell: Codierung der Dummy-Variablen Holzerntemethode.

Bez.	Beschreibung	liegt vor	Liegt nicht vor
A	Wipfel kurz, vorkonzentriert	1	0
B	Wipfel lang, vorkonzentriert	1	0
C	Wipfel kurz, verteilt	1	0
D	Wipfel lang, verteilt	1	0

Die ebenfalls erfasste manuelle Holzaufarbeitung liegt automatisch dann vor, wenn A, B, C und D den Wert 0 annehmen.

Tabelle 2.1-16: Teilprozess Bündeln - Lineares Regressionsmodell: Ablauf der schrittweisen Regression (Produktivität von Bündlern beim Einsammeln und Bündeln von Schlagabraum auf Kahlschlagflächen nach Windwurf als abhängige Variable).

Nr.	Einflussvariable	Delta R ²	Multiple R ²
1	Geländeneigung [Stufen]	0,408	0,408 (**)
2	Rundholzanfall [Efm/ha]	0,134	0,542 (*)
3	Zopfdurchmesser [cm]	0,092	0,634 (*)
4	Zopfdurchm. quadriert [cm]	0,068	0,702 (*)
5	Erntemethode B	0,033	0,735

* Die Einflussvariable ist auf dem Niveau 0,05 signifikant.

** Die Einflussvariable ist auf dem Niveau 0,01 signifikant.

Tabelle 2.1-17: Teilprozess Bündeln - Lineares Regressionsmodell: Ergebnis der Varianzanalyse für das Produktivitätsmodell für Bündler beim Aufarbeiten von Waldrestholz.

	Quadratsumme	FG	Mittlere Quadrs.	F	Signifikanz
Regression	185,386	5	37,077	10,531	0,0001
Residuen	66,898	19	3,521		
Gesamt	252,284				

Tabelle 2.1-18: Teilprozess Bündeln - Lineares Regressionsmodell: Variablen und Koeffizienten des Produktivitätsmodells für Bündler bei der Aufarbeitung von Waldrestholz.

	B	Std. von B	Beta	T
Konstante	-17,936	11,983		-1,497
Neig	-1,335	0,507	-0,509	-2,633
Efm	-0,008	0,004	-0,249	-1,853
Zopf	5,785	2,051	4,933	2,821
Zopf^2	-0,235	0,090	-4,439	-2,627
B	2,421	1,581	0,305	1,531

Tabelle 2.1-19: Teilprozess Bündelung – Kostenkalkulation Bündler.

A Eingangsdaten		P828	P410	P330
	<i>Motorleistung [kW]</i>	143		
	<i>Ladekapazität [Tonnen]</i>	12		
1.	Beschaffungspreis ohne USt. (Tsd. EUR)	293	65	155
2.	Veralterungszeit (Jahre)	10	5	10
3.	Normale Nutzungsdauer (MAS, gesamt)	17000	8500	17000
4.	Jährliche Einsatzdauer (MAS)	2000	1000	1000
5.	Reparaturkostenquote (echter Anteil)	1,0	1,2	1,0
6.	Kalkulat. Zinsfuß (%)	8	8	8
7.	Treibstoffverbrauch (l/MAS)	9	4	2
8.	Treibstoffkosten (EUR/l)	1,18	1,18	1,18
9.	Schmiermittelfaktor (echter Anteil)	0,2	0,4	0,6
10.	Restwert (Tsd. EUR)	29,3	0	0
11.	Mobilität (%)	1	0	0
12.	Sonstiges (% Besch.-Preis)	14	0	0
13.	Profit (%)	0	0	0
	Personal			
14.	Ausl.quote d. Maschine (echter Anteil)	0,8	0,0	0,0
15.	Personal (EUR/h)	14,50	0,00	0,00
16.	Personalnebenkosten (%)	60	0	0
B Kosten in EUR je Maschinenarbeitsstunde				
17.	Abschreibung	15,51	13,00	15,50
18.	Reparaturen	15,51	5,40	5,36
19.	Zins (kalkulatorisch)	6,45	2,60	6,20
20.	Betriebsstoffe	13,02	6,59	3,76
21.	Mobilität	1,47	0,00	0,00
22.	Sonstiges	20,51	0,00	0,00
23.	Profit	0,00	0,00	0,00
24.	Personal	29,00	0,00	0,00
C Gesamtkosten in EUR MAS		101,47	27,59	30,83

Tabelle 2.2-20: Teilprozess Bündelrückung – Eingesetzte Betriebsmittel Forwarder Pinox 818.

Technische Daten	Gewicht	19.600 kg
	Länge	9.318 mm
	Breite	2.720 mm
	Höhe	3.800 mm
	Anzahl Räder	8 Stück
	Ladefähigkeit	13 Tonnen
Ladeoberfläche	Ladefähigkeit	13 Tonnen
	Größe	4,3 m ²
Antrieb	Sisu Diesel 66 ETA	Sechszylinder-Reihenmotor
	Nennleistung	143 kW
Kraftübertragung	Hydrostatisch-mechanisch	160 kN
	Differential	Elektro-hydraulisch
Hydraulik	Grundmaschine (270 L Min ⁻¹)	LINDE HPR 135
Kran	Loglift F71	10 Meter Reichweite
Kontrollsystem	DASA	SAKAE ("Mini") Hebel

Tabelle: 2.3-21: Teilprozess Ferntransport Bündel - Eingesetzte Betriebsmittel.

Bezeichnung	Gliederzug Lkw Kurzholzzug	Gliederzug Lkw Kurzholzzug
Zugfahrzeug	MB 2648	MAN TGA 26.480
Anhänger	Heckkran Loglift 115Z	Heckkran Epsilon C80Z
Eigengewicht	19,0 t	18,0 t
Nutzlast	21,0 t	22,0 t
Ladevolumen	66 m ³	70 m ³

Tabelle 2.2-22: Teilprozess Ferntransport der Bündel - Kostenkalkulation Kurzholz Lkw.

A Eingangsdaten		Glieder- zug	Zugma- schine	An- hänger
	<i>Motorleistung (PS)</i>	480		
	<i>Nutzlast (Tonnen)</i>	21		
	<i>Maximales theoretisches Ladevolumen (m³)</i>	50		
1.	Beschaffungspreis ohne USt. (Tsd. EUR)	207	173	34
2.	Veralterungszeit (Jahre)	k.A.	7	10
3.	Restwert (Tsd. EUR)	21	17	4
4.	Anzahl der Achsen (St.)	5	3	2
5.	Anzahl der Reifen (St.)	14	10	4
6.	Wiederbesch.-preis Reifen (Tsd. EUR)	6	4	2
7.	Wiederbesch.-preis o. Reifen inkl. Restw. (Tsd. EUR)	180	152	28
8.	davon leistungsfähig abzuschreiben (%)	k.A.	50	k.A.
9.	davon zeitabhängig abzuschreiben (%)	k.A.	50	100
10.	Reifenlaufleistung Achse 1 (Tsd. km)	k.A.	150	250
11.	Reifenlaufleistung Achse 2 (Tsd. km)	k.A.	180	250
12.	Reifenlaufleistung Achse 3 (Tsd. km)	k.A.	180	k.A.
13.	Treibstoffverbrauch Leerfahrt			
13.a	Unbefestigte Waldwege (l/100km)	65		
13.b	Befestigte Waldwege (l/100km)	27,5		
13.c	Öffentliche Straße (l/100km)	27,5		
14.	Treibstoffverbrauch Lastfahrt			
14.a	Unbefestigte Waldwege (l/100km)	115		
14.b	Befestigte Waldwege (l/100km)	47,5		
14.c	Öffentliche Straße (l/100km)	47,5		
15.	Treibstoffverbr. Be- und Entladen (l/h)	5		
16.	Treibstoffkosten (EUR/l)	1,18		
17.	Mautsatz (EUR/km)	0,16		
	Personal			
18.	Ausl.quote d. Maschine (echter Anteil)	0,9		
19.	Personal Jahresbruttolohn (Tsd. EUR)	28		
20.	Sozialaufwendungen (Tsd. EUR)	16,8		
21.	Spesen (Tsd. EUR)	4		
22.	Fahrerfaktor (echter Anteil)	1,2		
	Annahmen			
23.	Jahreseinsatzzeit (h)	2106		
24.	Jahreslaufleistung (Tsd. km)	100		
25.	Umlaufvermögen (Tsd. EUR)	20		
26.	Kalkulat. Zinsfuß (%)	8		
27.	Reparaturkostenquote (echter Anteil)	0,7		

28.	Schmiermittelfaktor (echter Anteil)	0,03		
29.	Leerfahrtenquote (echter Anteil)	0,5		
30.	Polteranfahrt Waldwege (km)	2,5		
31.	Holzabfuhr Waldwege (km)	1,5		
32.	Anteil unbefestigte Waldwege (echter Anteil)	0,3		
33.	Anteil befestigte Waldwege (echter Anteil)	0,7		
34.	Zeitverbrauch Ladevorgang gesamt (h/Tour)	0,51		
35.	Zeitverbrauch Entladevorgang gesamt (h/Tour)	0,86		
36.	Zeitverbrauch Ladevorgang (h/Tour)	0,33		

Tabelle: 2.3-23: Teilprozess zentrale Holzaufbereitung - Eingesetzte Betriebsmittel Hammel VB 750D.

Technische Daten	Gewicht	17.000 kg
	Ladehöhe	2.700 mm
	Abwurfhöhe	3.400 mm
	Breite	2.500 mm
Zuführung	Extern	Von oben
	Muldenförmiger Kipptrichter	7 m³ Fassungsvermögen
Zerkleinerungswerkzeug	Wellen gegenläufig	2 Stück
	Wellenlänge	3.000 mm
	Wellendurchmesser	650 mm
	Schneidelemente	70 Stück (5-teilig)
	Umdrehung	Ca. 20 Min ⁻¹
Materialaustragung	Förderband	Magnetabscheider
Antrieb	Caterpillar C9	Sechszylinder-Reihenmotor
	Hubraum	9,3 Liter
	Nennleistung	257 kW
Kraftübertragung	Hydraulisch	Lastabhängig, Reversierend

Tabelle 2.4-24: Teilprozess zentrale Holzaufbereitung - Kostenkalkulation Vorbrecher Hammel.

A Eingangsdaten				750D
				60t/h
	<i>Motorleistung [kW]</i>			257
1.	Beschaffungspreis ohne USt. (Tsd. EUR)			228
2.	Veralterungszeit (Jahre)			4
3.	Normale Nutzungsdauer (MAS, gesamt)			17000
4.	Jährliche Einsatzdauer (MAS)			5000
5.	Reparaturkostenquote (echter Anteil)			1,32
6.	Kalkulat. Zinsfuß (%)			8
7.	Treibstoffverbrauch (l/MAS)			30
8.	Treibstoffkosten (EUR/l)			1,18
9.	Schmiermittelfaktor (echter Anteil)			0,1
10.	Restwert (Tsd. EUR)			22,8
11.	Grundstück (%)			0
12.	Sonstiges (% Besch.-Preis)			14
13.	Profit (%)			0

	Personal			
14.	Ausl.quote d. Maschine (echter Anteil)			2,0
15.	Personal (EUR/h)			14,00
16.	Personalnebenkosten (%)			60
	B Kosten in EUR je Maschinenarbeitsstunde			
17.	Abschreibung			12,07
18.	Reparaturen			15,93
19.	Zins (kalkulatorisch)			2,01
20.	Betriebsstoffe			40,06
21.	Mobilität			0,00
22.	Sonstiges			6,38
23.	Profit			0,00
24.	Personal			11,20
	C Gesamtkosten in EUR MAS			87,65

Tabelle: 2.4-25: Teilprozess zentrale Holzaufbereitung - Eingesetzte Betriebsmittel Komptech Crambo 5000.

Technische Daten	Gewicht	23.400 kg
	Ladehöhe	2.905 mm
	Abwurfhöhe	1.815 - 4.100 mm
	Breite	2.500 mm
Zuführung	Extern	Von oben
	Größe Ladeöffnung	2.800 x 3.330 mm
Zerkleinerungswerkzeug	Schnecken	2 Stück
	Schneckenlänge	2.820 mm
	Schneckendurchmesser	610 mm
	Schneidelemente	134 Stück
	Umdrehung	Max. 32 Min ⁻¹
Materialaustragung	Förderband	Magnetabscheider (optional)
Antrieb	Caterpillar C13	Sechszylinder-Reihenmotor
	Hubraum	13 Liter
	Nennleistung	328 kW
Kraftübertragung	Hydraulisch	Konstantleistungsregelung

Formel (2.4-1): Berechnung der zugeführten Leistung (P_{zu}) für den Wellenzerkleinerer Komptech Crambo 5000, entsprechend der Herstellerangaben zum verwendeten Dieselmotor.

$$P_{zu} = \frac{P_{ne}}{\eta_n} \cdot 100 \Rightarrow P_{zu} = \frac{328 kW}{45} \cdot 100 = 729 kW \quad (2.4-1)$$

Es gilt: P_{zu} = zugeführte Leistung [kW]
 P_{ne} = Nennleistung des Motors [kW]
 η_n = Motorwirkungsgrad bei Nennleistung [%].

Formel (2.4-2): Berechnung Dieserverbrauch bei Nennlast für den Wellenzerkleinerer Komptech Crambo 5000. Der Durchschnittsverbrauch von 54 Liter je Betriebsstunde im Rahmen des Feldversuchs legt nahe, dass der Motor in der Regel deutlich unter seiner Nennleistung betrieben wurde.

$$L_t = \frac{P_{zu}}{H_i \cdot \rho_{Di}} \Rightarrow L_t = \frac{729 kW}{11,8 kWh/kg \cdot 0,839 kg/L} = 74 L/h \quad (2.4-2)$$

Es gilt: ρ_{Di} = Massendichte von Dieselkraftstoff [kg/L]
 H_i = Heizwert Dieselkraftstoff [kWh/kg]
 L_t = Literverbrauch Diesel je Betriebsdauer bei Nennleistung [L].

Formel (2.4-3): Berechnung der elektrischen Leistungsaufnahme (P_{el}) am Beispiel des Wellenzerkleinerers Komptech Crambo 5000. Die benötigte mechanische Antriebsleistung (P_{me}) des Crambo 5000 bei Elektroantrieb beträgt gem. Herstellerangaben 300 Kilowatt.

$$P_{el} = \frac{P_{me}}{\eta_m} \cdot 100 \Rightarrow P_{el} = \frac{300 kW}{90} \cdot 100 = 333 kW \quad (2.4-3)$$

Es gilt: P_{el} = elektrische Leistungsaufnahme [kW]
 P_{me} = benötigte mechanische Antriebsleistung [kW]
 η_m = Motorwirkungsgrad bei der mittleren Auslastung [%]

Formel (2.4-4): Ermittlung des Energieverbrauchs (E_{el}) am vorliegenden Beispiel.

$$E_{el} = P_{el} \cdot t \Rightarrow E_{el} = 333 kW \cdot 1h = 333 kWh \quad (2.4-5)$$

Es gilt: E_{el} = Energieverbrauch elektrisch je Betriebsdauer [kWh]
 t = Betriebsdauer [h].

Tabelle 2.4-26: Teilprozess zentrale Holzaufbereitung - Kostenkalkulation Wellenzerkleinerer Komptech.

A Eingangsdaten		Diesel	Strom
		60t/h	60t/h
	<i>Motorleistung [kW]</i>	328	200
1.	Beschaffungspreis ohne USt. (Tsd. EUR)	288	244
2.	Veralterungszeit (Jahre)	4	4
3.	Normale Nutzungsdauer (MAS, gesamt)	22000	22000
4.	Jährliche Einsatzdauer (MAS)	5000	5000
5.	Reparaturkostenquote (echter Anteil)	1,90	1,90
6.	Kalkulat. Zinsfuß (%)	8	8
7.	Treibstoffverbrauch (l/MAS)	54	145,946
8.	Treibstoffkosten (EUR/l)	1,18	0,15
9.	Schmiermittelfaktor (echter Anteil)	0,1	0,1
10.	Restwert (Tsd. EUR)	28,8	24,4
11.	Grundstück (%)	0	0
12.	Sonstiges (% Besch.-Preis)	14	14
13.	Profit (%)	0	0
	Personal		
14.	Ausl.quote d. Maschine (echter Anteil)	2,0	2,0
15.	Personal (EUR/h)	14,00	14,00
16.	Personalnebenkosten (%)	60	60
B Kosten in EUR je Maschinenarbeitsstunde			
17.	Abschreibung	12,96	10,98
18.	Reparaturen	20,35	17,24
19.	Zins (kalkulatorisch)	2,53	2,15
20.	Betriebsstoffe	72,11	24,08
21.	Grundstück	0,00	0,00
22.	Sonstiges	8,06	6,83
23.	Profit	0,00	0,00
24.	Personal	11,20	11,20
C Gesamtkosten in EUR MAS		127,21	72,48

Tabelle: 2.4-27: Teilprozess zentrale Holzaufbereitung - Eingesetzte Betriebsmittel Komptech Sternsieb Multistar M3.

Technische Daten	Gewicht	17.000 kg
	Aufgabehöhe	2.800 mm
	Abwurfhöhe	3.200 - 4.100 mm
	Transportabmessung (LxBxH)	11.500 x 2.550 x 4.000 mm
Zuführung	Extern	Von oben
	Bunkervolumen	5 m ³
Siebwerkzeuge	Grobsiebabmessung (LxB)	2.132 x 1.138 mm
	Grobsiebfläche	2,4 m ²
	Feinsiebabmessung (LxB)	3.591 x 1.138 mm
	Feinsiebfläche	4,1 m ²
	Elastische Sterne	Mit Reinigungsfinger
Materialaustragung	Förderband	Magnetabscheider (optional)
Energieversorgung	Dieseldgenerator	Vierzylinder-Reihenmotor
	Netzbetrieb	440 V
	Anschlussleistung	39 kW
Kraftübertragung	Elektromotoren	Mit Frequenzumrichter

Tabelle 2.4-28: Teilprozess zentrale Holzaufbereitung - Kostenkalkulation Sternsieb.

A Eingangsdaten		Diesel	Strom
		120m ³ /h	120m ³ /h
	<i>Motorleistung [kW]</i>	46	41
1.	Beschaffungspreis ohne USt. (Tsd. EUR)	217	183
2.	Veralterungszeit (Jahre)	10	10
3.	Normale Nutzungsdauer (MAS, gesamt)	17000	17000
4.	Jährliche Einsatzdauer (MAS)	2000	2000
5.	Reparaturkostenquote (echter Anteil)	1,32	1,28
6.	Kalkulat. Zinsfuß (%)	8	8
7.	Treibstoffverbrauch (l/MAS)	9,1	41,2
8.	Treibstoffkosten (EUR/l)	1,18	0,15
9.	Schmiermittelfaktor (echter Anteil)	0,1	0,1
10.	Restwert (Tsd. EUR)	21,7	18,3
11.	Grundstück (%)	0	0
12.	Sonstiges (% Besch.-Preis)	14	14
13.	Profit (%)	10	0

	Personal			
14.	Ausl.quote d. Maschine (echter Anteil)		0,0	0,0
15.	Personal (EUR/h)		14,00	14,00
16.	Personalnebenkosten (%)		60	60
	B Kosten in EUR je Maschinenarbeitsstunde			
17.	Abschreibung		11,49	9,69
18.	Reparaturen		15,16	12,40
19.	Zins (kalkulatorisch)		4,77	4,03
20.	Betriebsstoffe		12,15	6,79
21.	Grundstück		0,00	0,00
22.	Sonstiges		15,19	12,81
23.	Profit		5,97	0,00
24.	Personal		0,00	0,00
	C Gesamtkosten in EUR MAS		64,74	45,72

Tabelle 2.4-29: Teilprozess zentrale Holzaufbereitung - Kostenkalkulation Radlader.

A Eingangsdaten			Modell A	Modell B
	<i>Schaufelinhalt [m³]</i>		1,5	3,0
1.	Beschaffungspreis ohne USt. (Tsd. EUR)		61,23	91,84
2.	Veralterungszeit (Jahre)		8	8
3.	Normale Nutzungsdauer (MAS, gesamt)		17000	17000
4.	Jährliche Einsatzdauer (MAS)		2000	2000
5.	Reparaturkostenquote (echter Anteil)		0,6	0,6
6.	Kalkulat. Zinsfuß (%)		8	8
7.	Treibstoffverbrauch (l/MAS)		7	8,5
8.	Treibstoffkosten (EUR/l)		1,18	1,18
9.	Schmiermittelfaktor (echter Anteil)		0,2	0,2
10.	Restwert (Tsd. EUR)		6,123	9,184
11.	Mobilität (%)		0	0
12.	Sonstiges (% Besch.-Preis)		14	14
13.	Profit (%)		0	0
	Personal			
14.	Ausl.quote d. Maschine (echter Anteil)		0,9	0,9
15.	Personal (EUR/h)		14,00	14,00
16.	Personalnebenkosten (%)		60	60
B Kosten in EUR je Maschinenarbeitsstunde				
17.	Abschreibung		3,44	5,17
18.	Reparaturen		1,83	2,75
19.	Zins (kalkulatorisch)		1,35	2,02
20.	Betriebsstoffe		9,88	12,00
21.	Mobilität		0,00	0,00
22.	Sonstiges		4,29	6,43
23.	Profit		0,00	0,00
24.	Personal		24,89	24,89
C Gesamtkosten in EUR MAS			45,68	53,25